

Formhonen von thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Florian Schweig, M.Sc.

aus (Geburtsort): München

eingereicht am: 14.07.2020

mündliche Prüfung am: 23.11.2020

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Dr. h.c. Bernhard Karpuschewski

Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

Zugl. Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2021

ISBN 978-3-8027-8362-3

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt, die dadurch begründeten Rechte, insbesondere der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Entnahme, vorbehalten.

©Vulkan-Verlag, Essen, 2021

Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen und Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Waren- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Für meine große Familie

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Arbeitsgruppe „Vorentwicklung und Innovationsmanagement“ des Bereichs „Produktionstechnik Antriebssysteme“ der BMW Group in München.

Allem voran gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder vom IWF der TU Braunschweig für seine Unterstützung und Förderung der Arbeit, den wertvollen fachlichen Austausch, die gewissenhafte Betreuung sowie die Übernahme des ersten Referats. Ganz herzlich bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Dr. h.c. Bernhard Karpuschewski für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Günter Bräuer für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission. Besonders danke ich Herrn Dr.-Ing. Hans-Werner Hoffmeister für die stets sehr gute Zusammenarbeit, die fruchtbaren Diskussionen und die fachliche Betreuung dieser Arbeit.

Ebenfalls richtet sich mein Dank an meine Kolleginnen und Kollegen bei BMW für die angenehme Arbeitsatmosphäre sowie die fachliche Unterstützung während der gesamten Zeit. Insbesondere möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Dr.-Ing. Thilo Spitznagel und Frau Dr.-Ing. Beate Schleif für die Durchsicht der Arbeit sowie die zahlreichen wertvollen Anmerkungen sowie fachlichen und persönlichen Gespräche bedanken, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Personen des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der Technischen Universität Braunschweig für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und die unvergessliche Zeit vor Ort. Ein ganz besonderer Dank für einfach alles gilt Herrn Dr.-Ing. Thomas Große und seiner Familie. Den externen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Andreas Wiens, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Gerhard Flores und Herrn Andreas Wagner möchte ich für den regen fachlichen Austausch und die fortwährende Unterstützung danken.

Mein besonderer Dank gilt meiner gesamten Familie und meinen Freunden, die mir alles ermöglicht, mich Tag für Tag unterstützt und in meinem Promotionsvorhaben bestärkt haben und ohne deren starken Rückhalt diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Von ganzem Herzen danke ich meiner lieben Frau Alexandra und unserer Tochter Ella für ihre Geduld, ihr Verständnis und ihren unerschütterlichen Glauben an ein Gelingen dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	X
FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN.....	XI
ABSTRACT	XVIII
1 EINLEITUNG UND MOTIVATION	1
2 STAND DER TECHNIK.....	3
2.1 Tribosystem Zylinderlaufbahn / Kolbengruppe	3
2.1.1 Funktion der Reibpartner im Tribosystem.....	3
2.1.2 Entstehung und Erfassung von Zylinderdeformationen	5
2.1.3 Mathematische Beschreibung und Erfassung unrunder Bohrungen	9
2.1.4 Auswirkungen der Zylinderverzüge auf das tribologische System	12
2.2 Zylinderlaufbahntechnologien von Verbrennungsmotoren	18
2.2.1 Konzepte und Entwicklungstrends von Laufbahntechnologien	18
2.2.2 Lichtbogendrahtspritzen: Verfahren und Schichtbildung	21
2.3 Zylindrisches Honen von Zylinderlaufbahnen	23
2.3.1 Definition und Wirkung der Einstellparameter auf das Honergebnis.....	23
2.3.2 Stand der Technik zum Honen thermischer Spritzschichten	28
2.3.3 Gängige Zustellsysteme und Werkzeugkonzepte	31
2.3.4 Beurteilung und tribologischer Einfluss gehonter Zylinderlauflächen.....	32
2.4 Honprozesse zur Berücksichtigung betriebsbedingter Verformungen	35
2.4.1 Herstellung unrunder Zylinderbohrungen ohne gesteuerte Vorschubbewegung.....	35
2.4.2 Formhonkonzepte ohne piezoelektrische Honleistenzustellung	37
2.4.3 Formhonkonzepte mit piezoelektrischer Honleistenzustellung	41
2.4.4 Beurteilung von formgehonten Zylinderbohrungen	45
2.5 Fazit zum Stand der Technik.....	49
3 ZIELSETZUNG DER ARBEIT	51
4 VERSUCHSANLAGEN UND –PROGRAMM	53

4.1	Honmaschine, Versuchsträger und Vorrichtungen.....	53
4.1.1	Versuchs-Formhonmaschine.....	53
4.1.2	Versuchsträger und Vorrichtungen	54
4.2	Werkzeug- und Zustellkonzepte.....	57
4.2.1	Formhonen: Werkzeug und Zustellung	57
4.2.2	Glätthonen: Werkzeug und Zustellung	59
4.3	Steuerungskonzept.....	61
4.4	Verwendete Messtechnik.....	64
4.4.1	Formmessung der gehonten Zylinderlaufbahnen.....	64
4.4.2	Oberflächencharakterisierung der gehonten Zylinderlaufbahnen.....	66
4.4.3	Verschleißmessung an den Honleisten	70
4.5	Versuchsprogramm	72
5	STEUERUNGSSEITIGE PROZESSOPTIMIERUNG	76
5.1	Vorbearbeitung der Versuchsträger	76
5.2	Anwendung des Stands der Technik auf thermischen Spritzschichten.....	78
5.2.1	Versuchsbeschreibung	78
5.2.2	Formgüte bei der Bearbeitung harmonischer Sollformen.....	80
5.2.3	Oberflächengüte bei der Bearbeitung harmonischer Sollformen.....	85
5.2.4	Zusammenfassung – Anwendung des Stands der Technik auf thermischen Spritzschichten.....	87
5.3	Skalierung der Ansteuermatrizen	89
5.3.1	Versuchsbeschreibung	89
5.3.2	Formhonen mit zeitlich konstanten Ansteuerspannungen	92
5.3.3	Formhonen mit zeitlich äquidistanter Skalierung der Steuerspannung	94
5.3.4	Formhonen mit zeitlich faktorieller Skalierung der Steuerspannung	96
5.3.5	Auswirkung der Skalierung auf die Oberflächentopographie	98
5.3.6	Zusammenfassung – Skalieren der Ansteuermatritzen.....	102
5.4	Optimierung der Richtungswechselfolge und –anzahl der Honspindel	103
5.5	Variation des Zerspanvolumens an der Bohrungsengstelle.....	107
5.5.1	Versuchsbeschreibung	107
5.5.2	Formhonergebnisse bei der Variation des Verlustaufmaßes	110

5.6	Variation Anpressdruck beim Glätthonen	115
6	SCHNEIDSTOFFVARIATION	122
6.1	Versuchsbeschreibung	122
6.2	Variation der Korngröße der Formhonleisten.....	124
6.2.1	Schneidstoffauswahl im Prozess Formhonen I.....	124
6.2.2	Schneidstoffauswahl im Prozess Formhonen II.....	129
6.2.3	Schneidstoffauswahl im Prozess Glätthonen I.....	132
6.2.4	Schneidstoffauswahl im Prozess Glätthonen II	135
6.3	Ersetzen der Hartmetall-Stützleisten durch feinkörnige Diamantleisten	139
6.4	Zusammenfassung - Schneidstoffvariation	144
7	NORMALKRAFTMESSUNG AN DER FORMHONLEISTE.....	146
7.1	Versuchsaufbauten und Versuchsbeschreibung	146
7.1.1	Abhängigkeit von Honleistenauslenkung und Zustellfrequenz	146
7.1.2	Versuchsaufbau und Kalibrierung der Kraftmessleiste	147
7.1.3	Untersuchung des Übertragungsverhaltens im Werkzeug	148
7.1.4	Dynamische In-Prozess-Messung der Honnormalkräfte	150
7.2	Quasistatische Versuche zur Bestimmung der Werkzeugdynamik	153
7.2.1	Quasistatisch unverspannter Versuchsaufbau	153
7.2.2	Quasistatisch verspannter Versuchsaufbau	156
7.2.3	Einfluss des Stützleistenanpressdrucks auf die Werkzeugdynamik	162
7.3	In-Prozess-Messung der Honleistennormalkräfte	164
7.3.1	Messung der Honleistennormalkraft unter Verwendung des Ist-Standes..	164
7.3.2	Prozessoptimierung beim Formhonen mittels Kraftmessuntersuchungen.	168
7.4	Zusammenfassung – Normalkraftmessung an der Honleiste	175
8	ABLEITUNG EINER OPTIMIERTEN PROZESSSTRATEGIE.....	176
8.1	Versuchsbeschreibung	176
8.2	Validierung eines an LDS-Schichten angepassten Formhonprozesses.....	178
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	186
10	LITERATURVERZEICHNIS	189

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Tribologisches System (links) [23, 24, 107, 146, 274], Tribosystem Zylinderlaufbahn / Kolbengruppe (rechts).....	3
Abbildung 2:	Schematische Darstellung von Zylinderverzügen [246].....	6
Abbildung 3:	Ursachen und Arten von Zylinderverzügen [159, 246]	7
Abbildung 4:	Schematische Darstellung harmonischer Fourierordnungen nach Kuhn [125] und Wiens [262].....	11
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Stribeckkurve inkl. der Reibungszustände und Schmierfilmdicke nach [93, 120, 249].....	14
Abbildung 6:	Schergeschwindigkeit nach [32]	14
Abbildung 7:	Übersicht Zylinderlaufbahntechnologien sowie deren Einteilung [255]	18
Abbildung 8:	Thermisches Spritzen – Schematische Darstellung nach [34].....	22
Abbildung 9:	Darstellung der Kinematik und Begriffsbestimmungen des Honens [155] .	23
Abbildung 10:	Einfluss der Hublänge l_H auf die Bohrungsform nach Flores [65]	27
Abbildung 11:	Zungenbildung nach Zwischenhonen [3] (links) und Oberfläche nach Fertighonen [14] in Abhängigkeit der Drehrichtung (Mitte, rechts)	30
Abbildung 12:	Rauheitsprofil und Kenngrößen der Materialanteilskurve nach DIN EN ISO 13565.....	33
Abbildung 13:	Montierte Honbrille [269].....	35
Abbildung 14:	Honen trochoidaler und ovaler Bohrungsformen [182, 209, 254].....	38
Abbildung 15:	Federnd gelagertes Honwerkzeug nach Weigmann [260]	39
Abbildung 16:	Schwenkhonen nach Weigmann [260]	40
Abbildung 17:	Numerisch gesteuertes Formhonkonzept nach Zurrin [275, 276]	41
Abbildung 18:	Adaptronisches Formhonkonzept der Fa. Nagel und des Fraunhofer IWU [48, 173, 176].....	42
Abbildung 19:	Piezo-hydraulisches Formhonkonzept [210]	43
Abbildung 20:	Formhonkonzept der Fa. Gehring Technologies GmbH [262, 265, 266]....	44
Abbildung 21:	Grafische Erläuterung der Begriffe Formausprägung, Formvolumen, Verlustvolumen [97]	46
Abbildung 22:	Charakterisierung gehonter Bohrungsformen [97]	48
Abbildung 23:	Zielsetzung.....	51
Abbildung 24:	Formhonmaschine am IWF der TU Braunschweig [262].....	54
Abbildung 25:	BMW R4-ZKG als Versuchsträger der dargestellten Formhonversuche	55

Abbildung 26:	Mikroschliff und REM der verwendeten LDS-Schicht [227, 238].....	56
Abbildung 27:	Formhoneinheit inkl. Grobzustellung [74] (links); Formhonwerkzeug (rechts)	58
Abbildung 28:	Schematische Darstellung des Glätthonwerkzeugs nach Patent DE102010032453A1 [183].....	60
Abbildung 29:	Prinzipskizze des verwendeten Formhonsteuerungskonzepts	61
Abbildung 30:	Adapter zur Messgerätaufnahme und Anbindung an das Werkstück [112]	64
Abbildung 31:	Anordnung Formmessebenen und Zustellebenen über der Bohrungshöhe nach Wiens [262]	66
Abbildung 32:	Erläuterungen zur standardisierten Darstellung der Faxfilmaufnahmen	67
Abbildung 33:	Messpunkte Honleistenverschleiß bzw. Stützleistenverschleiß.....	70
Abbildung 34:	Versuchsmethodik – Darstellung in Anlehnung an Klocke und König [115]	72
Abbildung 35:	Abmessungen Honleiste zum zylindrischen Vorhonen	77
Abbildung 36:	Ausgangszustand der Versuchsträger nach Vorhonenbearbeitung – Form.....	77
Abbildung 37:	Ausgangszustand der Versuchsträger nach Vorhonenbearbeitung – Rauheit .	77
Abbildung 38:	Ansteuerspannungen - Variation i_0 , i_2 , i_3 und i_4	80
Abbildung 39:	Formhonergebnisse der formgehonten harmonischen Sollformen i_0	81
Abbildung 40:	Formhonergebnisse der formgehonten harmonischen Sollformen i_2 , i_3 , i_4	82
Abbildung 41:	Ist-Stand – radiale Formausprägung und minimaler Zerspanweg je Honstufe	83
Abbildung 42:	Ist-Stand – Fourieranalyse der formgehonten Harmonischen (Incometermessung).....	84
Abbildung 43:	Rauheitskenngrößen der formgehonten harmonischen Sollformen bei max. Formausprägung	85
Abbildung 44:	Rauheitskenngrößen der formgehonten harmonischen Sollformen an der Bohrungseingestelle.....	86
Abbildung 45:	Faxfilmaufnahmen der formgehonten Harmonischen bei min. und max. Formausprägung	87
Abbildung 46:	Schematische Darstellung der Skalierungsmethoden nach [69].....	89
Abbildung 47:	Formänderung je Honstufe – ohne zeitliche Skalierung der Steuerspannungen (Referenz)	93
Abbildung 48:	Radiale FA je Überdeckung [mm] – Keine zeitliche Skalierung der Steuerspannungen	93

Abbildung 49:	Formänderung je Honstufe – Zeitlich äquidistante Skalierung der Steuerspannungen	95
Abbildung 50:	Radiale FA je Überdeckung [mm] – Zeitlich äquidistante Skalierung der Steuerspannungen	95
Abbildung 51:	Formänderung je Honstufe – Zeitlich faktorielle Skalierung der Steuerspannungen	97
Abbildung 52:	Radiale FA je Überdeckung [mm] – Zeitlich faktorielle Skalierung der Steuerspannungen	98
Abbildung 53:	Variation Skalierungsstrategie der Steuerspannungen – Faxbilder nach Formhonen II	98
Abbildung 54:	Variation Skalierungsstrategie der Steuerspannungen – Rauheit nach Formhonen II	100
Abbildung 55:	Variation Skalierungsstrategie der Steuerspannungen – Rauheit nach Glätthonen II	100
Abbildung 56:	Variation Skalierungsstrategie der Steuerspannungen – Faxbilder nach Glätthonen II	101
Abbildung 57:	Optimierung Richtungswechselfolge und -anzahl	103
Abbildung 58:	Variation Richtungswechselfolge und -anzahl – Formergebnis	104
Abbildung 59:	Variation Richtungswechselfolge und -anzahl – Beurteilung der Formtreue	105
Abbildung 60:	Variation Richtungswechselfolge und -anzahl – 2D Rauheitskennwerte – nach Glätthonen II.....	105
Abbildung 61:	Variation Richtungswechselfolge und -anzahl – Faxbildaufnahmen	106
Abbildung 62:	Schematische Darstellung der neuen Sollform [242]	107
Abbildung 63:	Schematische Darstellung der rauheitsbedingten Mindest-Zerspanmasse je Honstufe.....	108
Abbildung 64:	Auswirkung des Anlegedrucks auf Formausprägung und homogenen Zerspanweg	110
Abbildung 65:	Prinzipskizze – Nutzbares Kraftintervall zur Erzeugung der Sollform	111
Abbildung 66:	Variation Verlustaufmaß – Auswirkungen des Anlegewertes auf die Bohrungsform	112
Abbildung 67:	Variation Verlustaufmaß – taktile 2D-Rauheitskennwerte.....	112
Abbildung 68:	Variation Verlustaufmaß - Faxbildaufnahmen	113
Abbildung 69:	Variation Federhärte – radialer Zerspanweg je Honstufe	116

Abbildung 70:	Variation Federhärte – Auswirkungen auf Zylinderform	117
Abbildung 71:	Variation Federhärte – Differenzbildung Zylinderform bei max. Formausprägung	118
Abbildung 72:	Variation Federhärte – taktile 2D-Rauheitskennwerte	119
Abbildung 73:	Rauheit nach Glätthonen II in Abhängigkeit des radialen Zerspanwegs ...	119
Abbildung 74:	Variation Federhärte – Faxfilmaufnahmen	120
Abbildung 75:	Formhonen I – Mittlere Korngröße und nomineller Kornüberstand	125
Abbildung 76:	Schneidmittelvariation Formhonen I – radiale Formausprägung	126
Abbildung 77:	Schneidmittelvariation Formhonen I – Zerspanvolumen und Honleistenverschleiß	127
Abbildung 78:	Schneidmittelvariation Formhonen I – taktile Rauheitswerte	127
Abbildung 79:	Schneidmittelvariation Formhonen II – radiale Formausprägung	129
Abbildung 80:	Schneidmittelvariation Formhonen II – Verlustvolumen und Formvolumen	130
Abbildung 81:	Schneidmittelvariation Formhonen I/II – radiale homogene Zerspanung .	131
Abbildung 82:	Schneidmittelvariation Formhonen II – Rauheit.....	132
Abbildung 83:	Schneidmittelvariation Glätthonen I – radiale Zerspanung und Honleistenverschleiß	133
Abbildung 84:	Schneidmittelvariation Glätthonen I – Rauheit.....	135
Abbildung 85:	Schneidmittelvariation Glätthonen II – Rauheit	136
Abbildung 86:	Schneidmittelvariation Glätthonen II – Faxbilder	138
Abbildung 87:	Diamant-Stützleisten – Bearbeitungsergebnis im Vergleich zum Referenzprozess	140
Abbildung 88:	Einfluss der Diamant-Stützleisten auf die Bohrungsform	142
Abbildung 89:	Diamant-Stützleisten – Rauheit (links), Faxbilder (Mitte), REM Honleisten (rechts)	143
Abbildung 90:	Schematische Darstellung der entwickelten Kraftmessleiste [82, 242].....	147
Abbildung 91:	Schematische Darstellung der quasistatischen Versuchsaufbauten nach Wiens [262].....	148
Abbildung 92:	Darstellung des Versuchsaufbaus zur In-Prozess-Messung der Honnormalkraft [242]	152
Abbildung 93:	Weg-Spannungs-Hysterese der Formhonleisten bei 10 Hz (links); maximale Honleisten-auslenkung in Abhängigkeit von Steuerspannungsintervall bzw. Signalamplitude (rechts)	154

Abbildung 94:	Maximale Honleistenauslenkung in Abhängigkeit eines dreieck- (links) bzw. rechteckförmigen (rechts) Steuerspannungsintervalls	155
Abbildung 95:	Maximale Honleistenauslenkung in Abhängigkeit des Steuerspannungssignals	156
Abbildung 96:	Einfluss der Signalart der Steuerspannung auf den resultieren Normalkraftverlauf	157
Abbildung 97:	Ermittlung des Phasenversatzes zwischen Steuersignal und resultierender Honnormalkraft F_N	158
Abbildung 98:	Phasenversatzes zwischen Steuersignal und Honnormalkraft in Abhängigkeit der Zustellfrequenz	159
Abbildung 99:	Übertragungsverhalten des Formhonwerkzeugs für sinusoide Steuerspannungen	160
Abbildung 100:	Honleistennormalkraft in Abhängigkeit von Steuerspannungsamplitude und Mittelspannung	161
Abbildung 101:	Einfluss des Stützleistanpressdrucks auf die Werkzeugdynamik	162
Abbildung 102:	Mittlere Flächenpressung in Abhängigkeit von Steuerspannung und Hondauer für D172	165
Abbildung 103:	Mittlere Flächenpressung in Abhängigkeit von Steuerspannung und Hondauer für D35	166
Abbildung 104:	Flächenpressung je Überdeckung bei zeitlich konstanter Spannungsvorgabe (4. FO, 0 V - 10 V).....	167
Abbildung 105:	Flächenpressung je Überdeckung, Sollform 4. Harmonische, 0 V – 10 V, Formhonen I & II.....	167
Abbildung 106:	Zerspanvolumen und radiale Formausprägung; Formhonen I; alle Schneidmittelvarianten	169
Abbildung 107:	Flächenpressung Referenzbohrungen unskaliert und skaliert; Formhonen I	170
Abbildung 108:	Mittlere Flächenpressung je Überdeckung; Formhonen I; alle Schneidmittelvarianten	172
Abbildung 109:	Zerspanvolumen und radiale Formausprägung; Formhonen II; alle Schneidmittelvarianten	173
Abbildung 110:	Mittlere Flächenpressung je Überdeckung; Formhonen II; Schneidmittel D35.....	174

Abbildung 111: Faxfilmaufnahmen ausgewählter Schneidmittelvarianten nach Form- und Glätthonen.....	174
Abbildung 112: Beurteilung der gehonten Makrogeometrie – Abweichung von der Sollform	178
Abbildung 113: Beurteilung der gehonten Makrogeometrie – Rauheit je Honstufe	181
Abbildung 114: Beurteilung der formgehonten Makrogeometrie – Faxbildaufnahmen je Honstufe.....	182
Abbildung 115: Beurteilung der gehonten Makrogeometrie – Konfokale Rauheitsmessung je Honstufe.....	183
Abbildung 116: Zusammenfassende Betrachtung des verwendeten Formhonprozesses.....	184

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kriterien zur quantitativen Bewertung des Formfüllvermögens von Kolbenringen [174]	16
Tabelle 2:	Beurteilung des Stands der Technik – Formhonen und thermisches Spritzen	50
Tabelle 3:	Technische Daten der Versuchs-Formhonmaschine [47, 99]	53
Tabelle 4:	Taktile Rauheitsmessung – verwendete Einstellparameter und Grenzwerte	68
Tabelle 5:	Grenzwerte der 3-dimensionalen Rauheitskenngrößen	70
Tabelle 6:	Prozessparameter des zeitgesteuerten Vorhonprozesses	76
Tabelle 7:	Versuchsparameter – Anwendung des Formhonens auf LDS-Schichten	79
Tabelle 8:	Versuchsplan – zeitliche Skalierung der Ansteuerspannungen	91
Tabelle 9:	Versuchsplan – Variation des Zerspanvolumens an der Bohrungsengstelle	109
Tabelle 10:	Eingesetzte Federhärten bei der Glätthonbearbeitung	115
Tabelle 11:	Vorauswahl der Schneidmittelvarianten - Variation der Korngröße	123
Tabelle 12:	Stellsignalparameter zur Ansteuerung der Pizoaktoren	146
Tabelle 13:	Spezifikation der verwendeten Piezosensoren zur Ermittlung des Werkzeugverhaltens [169]	149
Tabelle 14:	Versuchsplan inkl. Parametervariationen der quasistatisch verspannten Versuche	150
Tabelle 15:	Spezifikationen Schleifring Fa. Rietech und Ladungsverstärker Kistler 5030 A2 [169]	151
Tabelle 16:	Parameter zur Formhonbearbeitung bei der In-Prozess-Honnormalkraft-Messung	152
Tabelle 17:	Bearbeitungsparameter unter Verwendung der abgeleiteten Prozessstrategie	176
Tabelle 18:	Beurteilung der gehonten Makrogeometrie – Radiale FA und radiale Zerspanung an Engstelle	180

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Größe
A_{HL}	mm^2	Honleistenfläche
A_{Ref}	-	Referenzachse des Referenzzylinders
a_H	m/s^2	Hubbeschleunigung
a_i	-	Fourierkoeffizient (Realanteil) der Ordnung i
b_h	mm	Breite der Honleiste
b_i	-	Fourierkoeffizient (Imaginäranteil) der Ordnung i
D	N/mm	Federhärte
d_{mean}	mm	Mittlerer Bohrungsdurchmesser
d_g	μm	Mittlerer Korndurchmesser
$d_{Umax/dt}$	$\mu\text{m/s}$	Formänderungsrate
d_w	mm	Durchmesser der Zylinderbohrung
E	N/m^2	Elastizitätsmodul
F_a	N	Axiale Kraftkomponente
FA	μm	Formausprägung
F_{AN}	N	Anlegekraft der Honleisten an der Bohrungswand
f_{fs}	-	Faktor zur zeitlichen Skalierung der Steuerspannungen
F_N	N	Normalkraft
F_{piezo}	N	Piezoaktorkraft
F_{Ref}	N	Referenznormalkraft
F_{RF}	N	Federkraft der radialen Umlauffedern am Honwerkzeug
F_t	N	Tangentialkraft
FV	mm^3	Formvolumen
h	μm	Schmierfilmdicke

i	-	Ordnung i ; Ordnungszahl; Laufvariable
I	m^4	Flächenträgheitsmoment des Kolbenrings
\vec{j}	A/mm^2	Stromdichte
K	-	Werkzeugübertragungsfaktor
K_{Kr}	-	Formfüllkoeffizient des Kolbenrings
l_h	mm	Länge der Honleiste
l_H	mm	Hublänge
l'_h	mm	Aktive Honleistenlänge
l_n	mm	(Gesamt-) Messstrecke
l_r	mm	Einzelmessstrecke
l_t	mm	Taststrecke
$l_{üo}$	mm	Honleistenüberlauf am oberen Bohrungsende
$l_{üu}$	mm	Honleistenüberlauf am unteren Bohrungsende
l_w	mm	Bohrungslänge; Werkstücklänge
$MP_{LSC,m}$	-	Mittelpunkte der Referenzkreise
M_{r1}	%	2D-Kennwert zur Beschreibung des Materialanteils in % des kleinsten Materialanteils des Rauheitskernprofils
M_{r2}	%	2D-Kennwert zur Beschreibung des Materialanteils in % des größten Materialanteils des Rauheitskernprofils
n	$1/\text{min}$	Drehzahl der Honspindel
N	-	Volumennutzfaktor
$p_F; p_n$	N/mm^2	Flächenpressung
p_{AN}	N/mm^2	Anlegedruck der Honleisten zu Prozessbeginn
p'_n	N/mm^2	Momentaner Honleistenanpressdruck
$p_{Soll(\varphi,h)}$	%	hub- und phasenabhängige Sollwert der Piezostapelaktorauslenkung
Q_w	mm^3/s	Zeitspanvolumen

Q'_w	$\text{mm}^3/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$	Bezogenes Zeitspanvolumen
Q''_w	$\mu\text{m}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$	Bezogene Formänderungsrate
r	mm	Radius
r_m	mm	Mittlerer Radius
r_{Ref}	mm	Radius des Referenzkreises
R_a	μm	2D-Kennwert zur Beschreibung des Mittenrauwerts
r_w	mm	Radius Werkstück; Bohrungsradius
R_{hon}	-	2D-Rauheitskennwert Beschreibung der Honriefen
R_k	μm	2D-Kennwert zur Beschreibung der Kernrautiefe
R_{lam}	μm	2D-Rauheitskennwert Beschreibung der Lamelligkeit
$R_{p0,2}$	N/m^2	0,2% Dehngrenze
R_{pk}	μm	2D-Kennwert zur Beschreibung der reduzierten Spitzenhöhe
R_{vk}	μm	2D-Kennwert zur Beschreibung der reduzierten Riefentiefe
R_{vv}	mm^3/cm^2	2D-Kennwert zur Beschreibung des Ölrückhaltevolumens
R_z	μm	2D-Kennwert zur Beschreibung der Rautiefe
S	-	Anzahl der Stützstellen
s_a	mm	radiale Honleistenanlenkung
S_{hon}	-	3D-Rauheitskennwert Beschreibung der Honriefen
S_k	μm	3D-Kennwert zur Beschreibung der Kernrautiefe
S_{Mr1}	%	3D-Kennwert zur Beschreibung des Materialanteils in % des kleinsten Materialanteils des Rauheitskernprofils
S_{Mr2}	%	3D-Kennwert zur Beschreibung des Materialanteils in % des größten Materialanteils des Rauheitskernprofils
S_{pk}	μm	3D-Kennwert zur Beschreibung der reduzierten Spitzenhöhe
S_{vk}	μm	3D-Kennwert zur Beschreibung der reduzierten Riefentiefe
S_{vv}	mm^3/dm^2	3D-Kennwert zur Beschreibung des Ölrückhaltevolumens
t_{DH}	s	Zeit je Doppelhub

t_h	s	Honzeit
t_k	s	Kontaktzeit
t_p	s	Prozesszeit
t_{takt}	s	Taktzeit
t_{tn}	s	Taktnebenzeit
$t_{\text{ÜD}}$	s	Honzeit je vollständiger Überdeckung
u_i	μm	Amplitude einer Fourierordnung
$U_{\text{KR}_{\text{max}}}$	mm	Formfüllvermögen des Kolbenrings
U_{Ein}	V	Eingangsspannung
$U_{\text{max},i}$	μm	Unrundheit (Spitze-zu-Spitze-Wert)
v	m/s	(Relativ-) Geschwindigkeit
V_Z	mm^3	Zerspanvolumen
v_c	m/min	Schnittgeschwindigkeit
v_H	m/min	Hubgeschwindigkeit
v_t	m/min	Tangentiale Schnittgeschwindigkeitskomponente
v_{tast}	mm/s	Tastgeschwindigkeit
VV	mm^3	Verlustvolumen
y_m	%	Maximales Steuersignal einer Sollwertmatrix
α	°	Honwinkel
α	10^{-6} K^{-1}	Längenausdehnungskoeffizient
$\dot{\gamma}$	s^{-1}	Schergeschwindigkeit
$\Delta dV/2$	μm	Verlустаufmaß
$\Delta R(\varphi)$	mm	Differenz zwischen radialer Istform und Sollform (Fertigungsabweichung)
$\Delta R(\varphi, h)$	mm	hub- und phasenabhängige radiale Abweichung vom Referenzzylinder
Δy	-	Offset zur zeitlichen Skalierung des Steuersignals

$\Delta\varphi$	°	Phasenversatz
η	Ns/m ²	Dynamische Viskosität
λ_c	mm	Grenzwellenlänge
λ_n	mm	Wellenlänge
μ	-	Reibwert
Y	°	Konuswinkel der Tragleiste bzw. Zustellstange
φ	°	(Kolbenumfangs-) Winkel
$\dot{\varphi}$	rad/s	Winkelgeschwindigkeit
$\varphi(t_{DH})$	°	Zurückgelegter Winkel je Doppelhub

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
a-C:H:W	Modifizierte, wasserstoffhaltige, amorphe Kohlenstoffschicht
Al	Aluminium
APS	Atmosphärisches Plasmaspritzen
BMW	Bayrische Motoren Werke
Bo	Bohrung
C	Kohlenstoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
CrN	Chromnitrid
CVD	Chemical Vapour Deposition (Chemische Gasphasenabscheidung)
D	Diamant
DH	Doppelhub
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	Diamond-like Carbon
DS	Druckseite

EMZ	Elektromechanische Zustelleinheit
EMZ-F	Kraftgeregelte elektromechanische Zustelleinheit
FEM	Finite-Elemente-Methode
FEPA	Europäischer Verband der Schleifmittelhersteller
FFT	Fast Fourier Transformation
FH	Formhonen
FO	Fourierordnung i
FR	Fahrtrichtung
FRH	Fahrtrichtung hinten
GDS	Gegendruckseite
GG	Grauguss
GJL	Gusseisen mit Lamellengraphit
GJS	Gusseisen mit Kugelgraphit
GJV	Gusseisen mit Vermiculargraphit
GL	Glätthonen
HVOF	High-velocity oxygen fuel
IPA	Isopropanol
IWF	Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
klW	Kleinste, lichte Weite (Bohrungseingstelle)
KOS	Koordinatensystem
KSS	Kühlschmierstoff
Kt	Karat
L	Linkslauf (Drehrichtung der Honspindel)
LDS	Lichtbogendrahtspritzen
LSC / LSCI	Least Square Circle
LSCY	Least Square Cylinder

ME	Messebene
MKS	Mehrkörpersimulation
Mn	Mangan
MP	Messpunkt
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
O	Sauerstoff
OEM	Original Equipment Manufacturers
OP-EA	Oberer Umkehrpunkt der virtuellen Sollwertmatrix
OT	Oberer Totpunkt
PTWA	Plasma-transferred Wire Arc
PVD	Physical Vapour Deposition (Physikalische Gasphasenabscheidung)
R	Rechtslauf (Drehrichtung der Honspindel)
R4	Reihen-Vier-Zylinderkurbelgehäuse
Ref	Referenz
REM	Rasterelektronenmikroskop
Si	Silizium
Subito	SUBITO SU Innenmessgerät
ÜD	Vollständige Überdeckung der Bohrungswand durch die Honleisten
UP-EA	Unterer Umkehrpunkt der virtuellen Sollwertmatrix
UT	Unterer Totpunkt
V1, ..., Vx	Variante
VH	Vorhonen
Vol. %	Volumenprozent
ZE	Zustellebene
ZKG	Zylinderkurbelgehäuse
ZME	Zwischenmessebene

Abstract

Steigendes Umweltbewusstsein, fortschreitende fossile Rohstoffverknappung sowie stetig wachsende Kundenanforderungen forcieren die Forderung nach leistungstärkeren und gleichzeitig effizienteren sowie emissionsarmen Fahrzeugen. Das in der vorliegenden Arbeit diskutierte Thema „Formhonen von thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen“ kann dabei einen Beitrag zur Zielerreichung in Form der Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren liefern.

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die Technologie des Formhons für die Anwendung auf thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen unter Gewährleistung aktueller Qualitätsanforderungen und –standards zu befähigen. Durch fertigungstechnisches Vorhalten betriebspunktspezifischer Zylinderdeformationen und unter Anpassung der tribologischen Systemparameter Kolben, Kolbenringe und Öl soll eine Effizienzverbesserung erzielt werden.

Zur Befähigung des Formhonverfahrens für thermische Spritzschichten werden in dieser Arbeit für die einzelnen Prozessschritte die Auswirkungen von Prozessgestaltung, Honleistenanpressdruck und Schneidmittelspezifikation auf das Bearbeitungsergebnis untersucht. Die Erfassung des orts aufgelösten Honleistenanpressdrucks erfolgt durch ein eigens entwickeltes In-Prozess-Kraftmesssystem, welches zusätzlich Rückschlüsse auf das Werkzeugübertragungsverhalten zulässt.

Die Bearbeitungsversuche sowie die Messergebnisse zeigen, dass lastpunktspezifische Anti-verzugskonturen unter Gewährleistung der geforderten Bearbeitungsqualität auf neuartigen, thermisch gespritzten Zylinderlaufflächen darstellbar sind.

1 Einleitung und Motivation

Das steigende Umweltbewusstsein, die fortschreitende Verknappung und sinkende Verfügbarkeit fossiler Rohstoffe sowie die Kundenforderung nach leistungstärkeren und gleichzeitig effizienteren und emissionsarmen Fahrzeugen verdeutlichen die stetig steigenden Anforderungen an die Entwicklung von Personenkraftwagen. Alternative Antriebskonzepte, wie beispielsweise der Elektromotor, verfügen bislang über einen geringen Marktanteil, weshalb dem Verbrennungsmotor auch mittel- bis langfristig eine bedeutende Rolle in der Automobilindustrie zukommen wird. Neben den gesellschaftlichen Forderungen unterliegt die zukünftige Entwicklung von Verbrennungskraftmaschinen in der Automobilindustrie jedoch auch starken politischen Vorgaben, welche Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen reglementieren. Dies wurde nicht zuletzt durch die 2009 in Kraft getretene EU Verordnung zur Verminderung der CO₂-Emissionen von Pkw deutlich, wonach der durchschnittliche CO₂-Ausstoß für in der EU gefertigte Neuwagen auf 95 g CO₂/km ab Ende 2020 begrenzt wurde [57].

Einen Beitrag zur angestrebten Verbrauchs- und Emissionsminderung können reibungsreduzierende oder auch gewichtsreduzierende Maßnahmen im Verbrennungsmotor leisten. Beim Kurbelgehäuse können beispielsweise durch den gezielten Einsatz von Aluminium-Silizium-Legierungen bis zu 50 % Gewichtsersparnis gegenüber Graugusskurbelgehäusen erzielt werden [12]. Bei Aluminium-Kurbelgehäusen stellt die Substitution der Grauguss-Buchse durch eisenbasierte thermische Spritzschichten einen weiteren Trend der Laufbahnentwicklung dar. Diese Technologie wird bei der BMW Group bereits seit 2011 in der Großserie angewendet. Neben der reinen Gewichtsersparnis bergen solche thermischen Spritzschichten zudem Potential zur thermischen und tribologischen Optimierung des Systems [238].

Das System Zylinderlaufbahn / Kolbengruppe bietet ein großes Potential zur Reibungsreduzierung, da diesem in Abhängigkeit des Betriebspunktes Reibleistungsanteile von ca. 30 % bis zu 50 % der Gesamtmotorreibung zugeordnet werden können [9, 135, 255]. Wird zudem der Neue Europäische Fahrzyklus (NEFZ) betrachtet, so entfallen ca. 15 % des Kraftstoffverbrauchs auf die Gesamtmotorreibung und somit zwischen 4,5 % und 7,5 % auf das Tribosystem Kolbengruppe / Zylinderlaufbahn [246]. Der Fokus aktueller Forschungs- und Entwicklungsvorhaben liegt dabei oft auf der Entwicklung reibungs- und verschleißoptimierter Laufbahnwerkstoffe und Oberflächenstrukturen.

Zur Erreichung tribologisch optimierter Oberflächenmikrostrukturen werden die Zylinderbohrungen hochpräzise gehont. Neben der Laufbahnmikrostruktur spielt für die Funktion jedoch

auch die Laufbahnmakrostruktur eine wichtige Rolle. Nach dem zylindrischen Honen der Zylinderlaufbahnen kommt es infolge der Zylinderkopfverschraubung mit dem Kurbelgehäuse, den thermischen Bauteilverformungen und den dynamischen Belastungen im realen Motorbetrieb zu Deformationen der Zylinder. Diese Zylinderverzüge besitzen in Abhängigkeit der Strukturmechanik und Bauart des Kurbelgehäuses sowie des betrachteten Betriebspunkts eine deutliche Ausprägung (radialer Zylinderverzug kann mehr als 100 μm betragen). Darüber hinaus übertreffen die Zylinderverzüge die Fertigungstoleranzen (z. B. Zylinderformtoleranz $\leq 14 \mu\text{m}$) der Honoperation um ein Vielfaches.

Die montage- und betriebsbedingten Zylinderverzüge wirken sich nachteilig auf das Funktionsverhalten des Motors aus. Beispielsweise müssen die Kolbenringe zur Regulierung des Ölhaushaltes oder zum Abdichten des Brennraums vollständig an der Zylinderlauffläche anliegen [255]. Eine Reduktion der Ringvorspannung zur Erzielung von Reibungsvorteilen ist daher lediglich in dem Maße möglich, solange das Formfüllvermögen der Kolbenringe zum Ausgleich der Zylinderdeformationen ausreicht und das Funktionsverhalten nicht beeinträchtigt wird. Dies führt zu dem Ansatz, die Zylinderverzüge über konstruktive Maßnahmen hinaus weiter zu reduzieren, um somit das vorhandene Potential zur Reibungsminderung weiter zu erschließen. Das fertigungstechnische Einbringen von zylinderspezifischen Vorhaltekonturen mittels Formhonen stellt eine Lösungsmöglichkeit mit vielen Freiheitsgraden dar. Da die Formhonung im letzten Prozessschritt der Kurbelgehäuse-Fertigung erfolgt, muss der Prozess so entwickelt werden, dass der angestrebten Makrostruktur (Form) die auf das tribologische System angepasste Mikrostruktur (Oberfläche) überlagert wird. Weiterhin gilt es die Form- und Lagetoleranzen, unter Beibehaltung der auf die thermische Spritzschicht abgestimmten Oberflächenkennwerte, neu zu definieren.

Als Beitrag zur Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren soll in der vorliegenden Arbeit soll ein bestehendes, piezoelektrisches Formhonkonzept [177, 262] für den industriellen Serieneinsatz weiterentwickelt werden. Neben der technologischen Befähigung stellen die Prozessentwicklung und die Anwendbarkeit der Technologie bei gleichzeitiger Verwendung thermisch gespritzter Zylinderlaufbahnen die zentralen Schwerpunkte dieser Arbeit dar. Dies beinhaltet zudem die Einhaltung vorgegebener, enger Formtoleranzen, die Erzielung tribologisch vorteilhafter Oberflächenstrukturen sowie kurze Prozesszeiten bei hohen Werkzeugstandzeiten. Da die Erreichung dieser Qualitätskriterien bislang nicht untersucht wurde, wird die Technologie des Formhonens bis dato industriell nicht angewendet.

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des tribologischen Systems Zylinderlaufbahn / Kolbengruppe dargestellt und die Zylinderlaufbahntechnologien von modernen Verbrennungsmotoren vorgestellt. Weiterhin wird der Stand der Technik des zylindrischen sowie des unrunder Honens dargestellt und bewertet.

2.1 Tribosystem Zylinderlaufbahn / Kolbengruppe

Die nachstehenden Unterkapitel stellen die Funktionen aller Reibpartner im tribologischen System Zylinderlaufbahn / Kolbengruppe dar und erläutern, wie Zylinderdeformationen entstehen, mathematisch beschrieben werden und das Funktionsverhalten eines Verbrennungsmotors beeinflussen.

2.1.1 Funktion der Reibpartner im Tribosystem

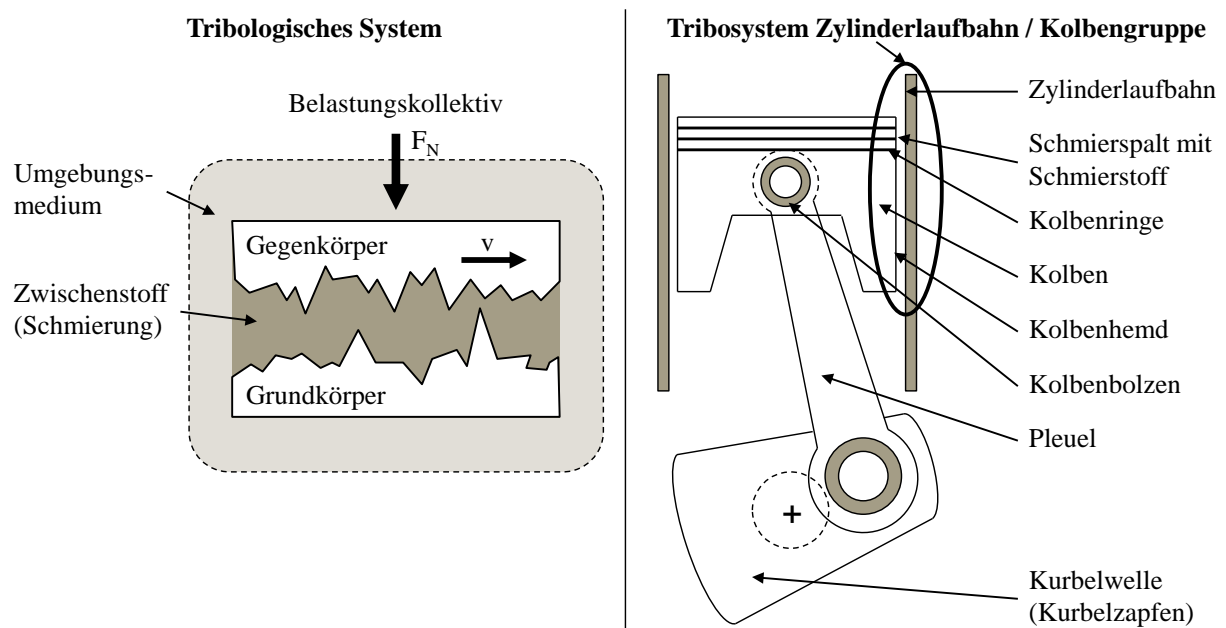


Abbildung 1: Tribologisches System (links) [23, 24, 107, 146, 274], Tribosystem Zylinderlaufbahn / Kolbengruppe (rechts)

Ein tribologisches System setzt sich stets aus Grund- und Gegenkörper, Zwischenstoff, Umgebungsmedium und Belastungskollektiv zusammen [23, 24, 107, 120, 146, 274]. Entsprechend Abbildung 1 bilden im tribologischen System Zylinderlaufbahn / Kolbengruppe die Zylinderlaufbahn den Grundkörper, der bewegte Kolben mit den Kolbenringen den Gegenkörper, das Motoröl den Zwischenstoff und die mit Ölnebel angereicherte Luft das Umgebungsmedium [6, 81]. Dabei soll auf die Funktionen von Kolben, Kolbenringen und Zylinderlaufbahn näher eingegangen werden:

Kolben:

Die Aufgabe des Kolbens besteht darin, die eingeleiteten Gaskräfte über Kolbenbolzen und Pleuel auf die Kurbelwelle zu übertragen und im Zusammenspiel mit den Kolbenringen den Brennraum zu begrenzen sowie diesen gegenüber dem Kurbelraum abzudichten. Ein großer Teil der bei der Verbrennung auf die brennraumbegrenzenden Dichtflächen einwirkenden Temperaturen fließt über die Kolbenringe, den Kolben und das an der Zylinderlaufbahn befindliche Schmieröl an die Zylinder und schließlich an das Kühlmedium ab [6, 81, 117, 255].

Kolbenringe:

Überwiegend werden die Kolben heutiger Pkw mit dreiteiligen Kolbenringpaketen ausgestattet [6, 81, 117, 128, 255], welche als Kompressionsring, Zwischenring und Ölabbstreifring bezeichnet werden. Zweiteilige Kolbenringpakete für Pkw-Motoren befinden sich derzeit nicht im Serieneinsatz, da sie die thermodynamischen Randbedingungen nicht erfüllen. Die Kolbenringe dichten den Brennraum gegenüber dem Kurbelgehäuseraum ab. Weiterhin dienen sie der Wärmeabfuhr vom Kolben zum Kurbelgehäuse und regulieren den Ölhaushalt [105, 117, 121, 255]. Die Dichtwirkung wird durch eine möglichst vollflächige radiale Anlage der Ringlauffläche an der Zylinderlaufbahn sowie der Anlage einer Ringflanke an der Kolbenringnut erreicht [81]. Diese axiale Anlage kann aufgrund der oszillierenden Kolbenbewegung zwischen oberer und unterer Ringnut wechseln und wird durch den wirkenden Gasdruck, die Beschleunigungs- und Reibungskräfte bestimmt. Die radiale Abdichtung des Brennraums ist in hohem Maße von der Tangentialspannung, der am Ringrücken wirkenden Gaskraft sowie dem Formfüllvermögen [59, 251] der einzelnen Kolbenringe abhängig.

Zylinderlaufbahn:

Die Zylinderlaufbahn begrenzt den Arbeitsraum des Motors, dient der Führung der bewegten Kolbengruppe und ist verantwortlich für den Wärmetransport vom Brennraum zum Kühlwassermantel. Die Funktion der Zylinderlaufbahn wird hauptsächlich durch ihre Form und Oberfläche sowie den eingesetzten Werkstoff beeinflusst [6, 63, 81, 105, 255]. Infolge der Zylinderkopfverschraubung, den thermisch induzierten Bauteilverformungen und den dynamischen Belastungen im befeuerten Motorbetrieb kommt es zu Deformationen der Zylinder sowie der zylindrisch gehonten Laufflächengeometrie (Kapitel 2.3).

2.1.2 Entstehung und Erfassung von Zylinderdeformationen

Für eine effiziente Motorauslegung sind eine gute Abdichtung des Motorbrennraums sowie geringe mechanische Reibungsverluste – beispielsweise durch Kolben und Kolbenringe – erforderlich. Hierzu wird eine zylindrische Bohrung mit einem möglichst ideal kreisrunden Querschnitt angestrebt [105]. Kleinere radiale Formabweichungen von der Sollform können noch durch das Formfüllvermögen der Kolbenringe ausgeglichen werden [6]. Zu große Formabweichungen vom idealen Zylinder beeinträchtigen die Motorfunktion (Reibung, Blow-by, Kraftstoff- und Ölverbrauch) und können die Lebensdauer des Motors verringern oder sogar zum Motorschaden führen [6, 105, 109, 117, 251].

Moderne Honverfahren ermöglichen zwar die Fertigung von Zylinderbohrungen mit sehr geringen Fertigungstoleranzen (im einstelligen Mikrometerbereich). Die Zylinderbohrung verformt sich jedoch wieder bei der Montage und im Betrieb. Diese Deformationen werden allgemein als Zylinderverzüge bezeichnet [262]. Für einen Referenzmotor sind die Verzüge exemplarisch in Abbildung 2 dargestellt. Nach Lönne [132] können diese entsprechend ihrer Ursache wie folgt eingeteilt werden:

- Die **kaltstatischen Zylinderverzüge** werden maßgeblich durch die bei der Montage des Zylinderkopfes, der Zylinderkopfdichtung sowie den Kurbelwellenlagern auftretenden Verspannungen infolge der Schraubkrafteinwirkung verursacht. Fernerhin wird der Montage von peripheren Bauteilen (Nebenaggregate und Motoraufhängung) eine Auswirkung auf die Zylinderverzüge beigemessen. Dabei handelt es sich in der Regel um elastische Verformungen, welche mit herkömmlichen Messverfahren im verspannten Zustand gut erfassbar sind [105, 130].
- **Quasistatische Zylinderverzüge** treten während des Motorbetriebs auf und resultieren aus der unterschiedlichen Wärmeausdehnung der beteiligten Bauteile sowie den Wärmespannungen aufgrund von inhomogener Temperaturverteilung im Zylinderkurbelgehäuse (ZKG) [105, 262].
- Die kalt- und quasistatischen Deformationen werden zusätzlich von **dynamischen Zylinderverzügen** überlagert. Diese werden durch zyklisch wechselnde Belastungen (Gaskräfte und die vom Kolben auf die Zylinderlaufbahn übertragene Normalkraft / Anlegekraft) im Motorbetrieb hervorgerufen. [105, 132, 143, 262].

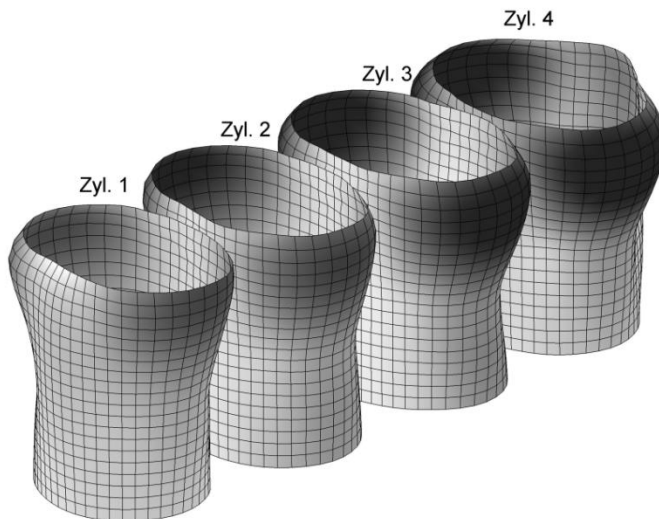


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Zylinderverzügen [246]

Die Verzugsursachen liegen an jedem Motor vor und wirken immer gemeinsam. Daher setzt sich die Gesamtabweichung der Zylinderform vom idealen Sollzylinder aus allen genannten Einzelverformungen zzgl. der Fertigungstoleranzen zusammen. Durch Eigenspannungen oder thermisch induzierte Relaxationsprozesse können plastische Verformungen auftreten [174]. Dies konnte anhand kaltstatischer Messungen an gelaufenen Testmotoren nachgewiesen werden. Der Absolutwert der Zylinderverzüge hängt – wie auch die fertigungstechnischen Sollformabweichungen – von den konstruktiven Merkmalen des betrachteten Motors ab [262]. Konstruktionsparameter, welche die Art und Ausprägung der Zylinderverzüge beeinflussen, sind nach Wiens [262] und Josef [105]:

- **Motorbauform:** Motoren in open-deck Bauweise (siehe Abbildung 3) weisen im Vergleich zu Motoren mit vereinzelt Durchbrüchen der Deckfläche für den Kühlkreislauf (closed-deck Konstruktion) zumeist höhere Zylinderverzüge auf, wohingegen sich bei den closed-deck Motoren die Montageverzüge deutlicher auf die Verzugsgeometrie auswirken [105, 132, 262].
- **Anzahl der vorhandenen Zylinder sowie deren Position:** Bei innenliegenden Zylindern – Zylinder, die an zwei Seiten von je einem Zylinder umgeben sind – stellen sich eher symmetrische Zylinderverzüge ein, als bei außenliegenden Zylindern, welche einseitig an der Getriebe- oder Steuerseite des Motorblocks anliegen [125].
- Durch die **Lage und Ausführung des Wassermantels** (inkl. Position von Ein- und Auslass des Kühlwassers) oder die Wasserpumpe können die Verzüge von einzelnen Zylindern beeinflusst werden [105].
- **Art der Anbindung des Zylinderkopfes an das Kurbelgehäuse** [105, 132, 143]: Eine Zugankerverbindung erzeugt geringere Deformationen als eine konventionelle Zy-

linderkopfverschraubung, welche wiederum von der Zugkraft in den Schrauben, der Anzahl der Schrauben sowie deren Abstand zueinander abhängig sind. Eine Erhöhung der Anzahl an Zylinderkopfschrauben reduziert die Verzugsamplituden, jedoch entstehen dadurch Deformationen höherer Ordnung (siehe Kapitel 2.1.3), welche gegenüber Deformationen geringerer Fourierordnung schlechter durch das Formfüllvermögen der Kolbenringe (siehe Tabelle 1) ausgeglichen werden können.

- **Konstruktionsmerkmale** des **Gesamtmotors**, wie Durchmesser, Wandstärke, Höhe und Ausführung der Zylinderbuchse, Dicke des Topdecks, Planheit der Deckfläche oder Verrippung sind zusätzlich mitverantwortlich für die Art und Ausprägung der Zylinderverzüge [61, 258].

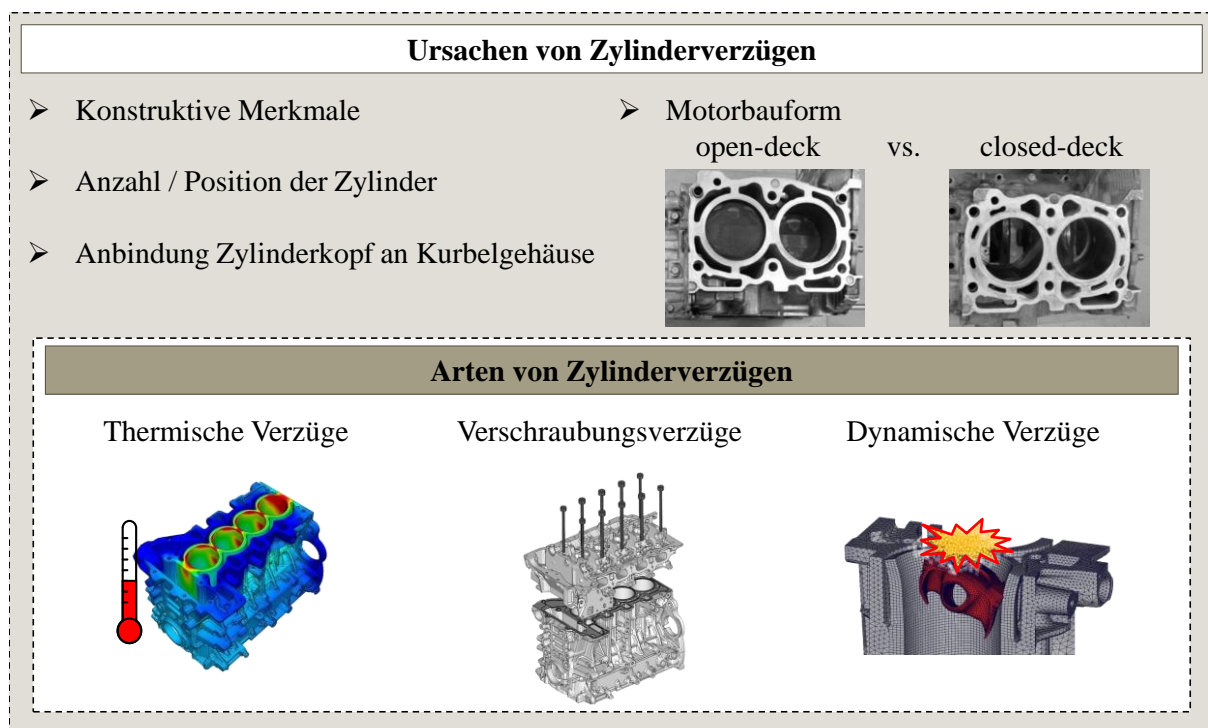


Abbildung 3: Ursachen und Arten von Zylinderverzügen [159, 246]

Die betriebspunktspezifischen Zylinderverzüge können mittels der Methode der finiten Elemente (FEM) berechnet werden. Strukturmechanische Eigenschaften der betrachteten Zylinderlaufbuchse sowie die betriebspunktabhängige Temperatur- und Lastverteilung werden bei der FEM berücksichtigt [144, 145]. Darüber hinaus existieren statische und dynamische Verfahren zur messtechnischen Erfassung der Zylinderdeformationen, welche gleichzeitig als Grundlage der Modellbildung dienen.

Die Formmessungen im kaltstatisch verspannten und unverspannten Zustand erfassen fertigungstechnische Abweichungen sowie den kaltstatischen Verspannungszustand. Die Messungen im warmstatisch verspannten Bauteilzustand liefern Ergebnisse zur temperaturabhängigen

und unterschiedlichen Wärmeausdehnung des Kurbelgehäuses. Weiterhin dienen diese Messergebnisse der optimalen Auslegung eines Spannungskörpers für eine Brillenhonbearbeitung [191, 260, 261]. Bei der Messung statischer Zylinderdeformationen kommen zumeist 3D-Koordinatenmessgeräte, Formtester oder spezielle Messsysteme, wie das Incometer zum Einsatz [104, 131, 152, 158, 166].

Die Zylinderdeformationen werden im befeuerten Motorbetrieb mittels dynamischer Messmethoden unter Verwendung von Dehnmessstreifen [123], Taststiften [247] oder Wirbelstromsensoren [151] erfasst. Weitere Messmethodiken werden von der FEV GmbH [136], der IAV GmbH [174], Josef [105] und Kuhn [125] beschrieben, bei welchen acht auf dem Hall-Prinzip basierende Sensoren zum Einsatz kommen. Diese Sensoren sind im Kolben integriert und äquidistant über den Umfang verteilt. Unter der Berücksichtigung der Kolbensekundärbewegung kann so der Abstand zur Bohrungswand messtechnisch erfasst werden. Bei den Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die anliegende Motorlast aufgrund des differierenden Wärmeeintrags die Zylinderverzüge maßgeblich beeinflusst und sich eine Änderung der Zylinderkopfschraubkraft nahezu proportional auf die kaltstatischen Verzugskomponenten auswirkt. Weiterhin kann der Einfluss des Verbrennungsdruckes (Variation bis 200 bar) auf die Zylinderdeformationen lediglich bei Dieselmotoren in geringem Ausmaß festgestellt werden. Darüber hinaus zeigt die zeitgleiche Messung von benachbarten Zylinderbohrungen keine wechselseitige Einflussnahme. Kuhn [125] vergleicht zudem Vollaluminium-ZKGs und ZKG-Varianten aus Grauguss (GG). Dabei unterscheidet sich lediglich die räumliche Ausrichtung der Deformationen. Als nachteilig bei diesen Messmethoden ist die geringe Anzahl an Messsensoren zu bewerten, wodurch sich nur Formanteile bis einschließlich der 4. Fourierordnung auswerten lassen.

2.1.3 Mathematische Beschreibung und Erfassung unrunder Bohrungen

Gestaltabweichungen von einer definierten Idealgestalt werden laut DIN 4760 [25] in 6 Ordnungen unterteilt, wobei die 1. Ordnung die Formabweichung von der Sollgeometrie beschreibt. Die weiteren Ordnungen charakterisieren Wellig- und Rauigkeiten sowie geometrische Oberflächeneffekte, die aus der Mikrostruktur der Werkstoffe resultieren. Zur Bewertung der Formabweichung muss nach DIN 4760 die gesamte Werkstückoberfläche herangezogen werden [25].

Die mathematische Beschreibung der Zylinderdeformationen sowie der fertigungstechnischen Sollformabweichungen erfolgt durch die Zerlegung des Messsignals mittels Fourieranalyse [35, 49, 105, 116, 131, 132, 153]). Die endlichen Längensignale der Rundheitsmessungen in unterschiedlichen, aber stets horizontalen Zylinderhöhen werden hierbei als 2π -periodische Funktion $f(x)$ erfasst und mittels Fourieranalyse in die nachfolgende trigonometrische Funktion überführt [17, 60, 105, 125, 262].

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} [a_i \cdot \cos(ix) + b_i \cdot \sin(ix)] \quad (1)$$

Die Messpunkte der Zylinderformmessung werden in einer bestimmten Anzahl von diskreten Abstandswerten erfasst, weshalb keine Funktion $f(x)$ gegeben ist. Die Messwerte werden über den Kolbenumfangswinkel φ für eine horizontale Zylinderschnittebene aufgetragen und können durch ein trigonometrisches Polynom $\Delta R(\varphi)$ approximiert werden.

$$\Delta R(\varphi) = a_0 + \sum_{i=1}^n [a_i \cdot \cos(i\varphi) + b_i \cdot \sin(i\varphi)] \quad (2)$$

$\Delta R(\varphi_k) = r_k$ beschreibt daher die radiale Abweichung von einem Referenzpunkt an einer definierten Winkelposition φ_k in einer horizontalen Zylinderschnittebene wobei die Winkelpositionen äquidistant über den Bohrungsumfang verteilt sein müssen. Aufgrund einer wesentlichen Vereinfachung des Rechenalgorithmus wird die Anzahl der Stützstellen S geradzahlig angesetzt. Die Ordnungszahl $i = n$ entspricht dabei der maximal darstellbaren Harmonischen und die Koeffizienten a_i (Realteil) und b_i (Imaginärteil) nehmen dann folgende Form an:

$$a_0 = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^S r_k \quad (3)$$

$$a_i = \frac{2}{S} \sum_{k=1}^S r_k \cdot \cos(i \cdot \varphi_k) \quad (4)$$

$$b_i = \frac{2}{S} \sum_{k=1}^S r_k \cdot \sin(i \cdot \varphi_k) \quad (5)$$

Bei $k = n$ gleichmäßig über den Umfang verteilten Winkelpositionen φ_k können

$$k = n = \frac{S}{2} \quad (6)$$

Fourierkoeffizienten berechnet werden. Aufgrund der Forderung nach einer 2π -Periodizität ergibt sich für das letzte Glied der trigonometrischen Reihe folgender Zusammenhang:

$$b_{k=n=\frac{S}{2}} = \frac{2}{S} \sum_{k=1}^S r_k \cdot \sin\left(\frac{S}{2} \cdot k \cdot \frac{2\pi}{S}\right) = \frac{2}{S} \sum_{k=1}^S r_k \cdot \sin(k\pi) \quad (7)$$

Die Anzahl aller Fourierkoeffizienten (inkl. a_0) ist gleich der Anzahl an Mess- bzw. Stützstellen, wodurch der Fall der trigonometrischen Interpolation vorliegt. Dies hat zur Folge, dass $\Delta R(\varphi)$ die Stützstellen nicht nur approximiert, sondern durch diese hindurchgeht. Jedem harmonischen Formanteil (Index i = Ordnungszahl) können die Amplituden u_i sowie die Phasenlage φ_i zugeordnet werden, für welche gilt:

$$u_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad (8)$$

$$\varphi_i = \tan^{-1}\left(\frac{b_i}{a_i}\right) \quad (9)$$

Da bei der Betrachtung der Zylinderform der Spitze-zu-Spitze-Wert der jeweiligen Fourierordnung i von Bedeutung ist, wurde der Begriff der „Unrundheit $U_{max,i}$ “ [131, 275] eingeführt, welcher die doppelte Amplitude u_i beschreibt. Abbildung 4 zeigt eine schematische Darstellung der 0. bis 4. Fourierordnung. Formanteile höherer Fourierordnung ergeben sich analog durch eine Erhöhung der Wellenzahl [262].

Die Harmonische 0. Ordnung kennzeichnet eine reine Durchmesseränderung der Zylinderbohrung, welche aus einer über dem Umfang gleichmäßigen Erwärmung resultiert. Diese Deformationen können durch das Kolbenringpaket gut ausgeglichen werden. Allerdings vergrößert sich hierdurch das Stoßspiel der Ringe, was zu einer Zunahme des Arbeitsgasverlustes

(Blow-by) führt. Für die Kolbenhemdreibung ist neben dem lokalen Kolbenspiel eine sich über der Bohrungshöhe verändernde 0. Fourierordnung entscheidend (siehe auch Kapitel 2.1.4). Die Fourierkoeffizienten 1. Ordnung beschreiben Exzentrizitäten einzelner Messebenen zur Bohrungsachse oder eine Schiefstellung der gesamten Bohrung. Ovale Zylinderverzugsanteile werden durch den Fourierkoeffizienten 2. Ordnung gekennzeichnet. Diese entstehen durch unterschiedliche Wärmeausdehnung von Zylinderrohr und Außengehäuse in Kombination mit dem Zylinderverbund. Zylinderverzüge 3. und 4. Ordnung beschreiben eine dreiecks- bzw. kleeblattförmige Verzugskomponente wie sie bei der Zylinderkopfverschraubung mit 6 bzw. 4 Zylinderkopfschrauben je Bohrung entsteht [105, 125, 131].

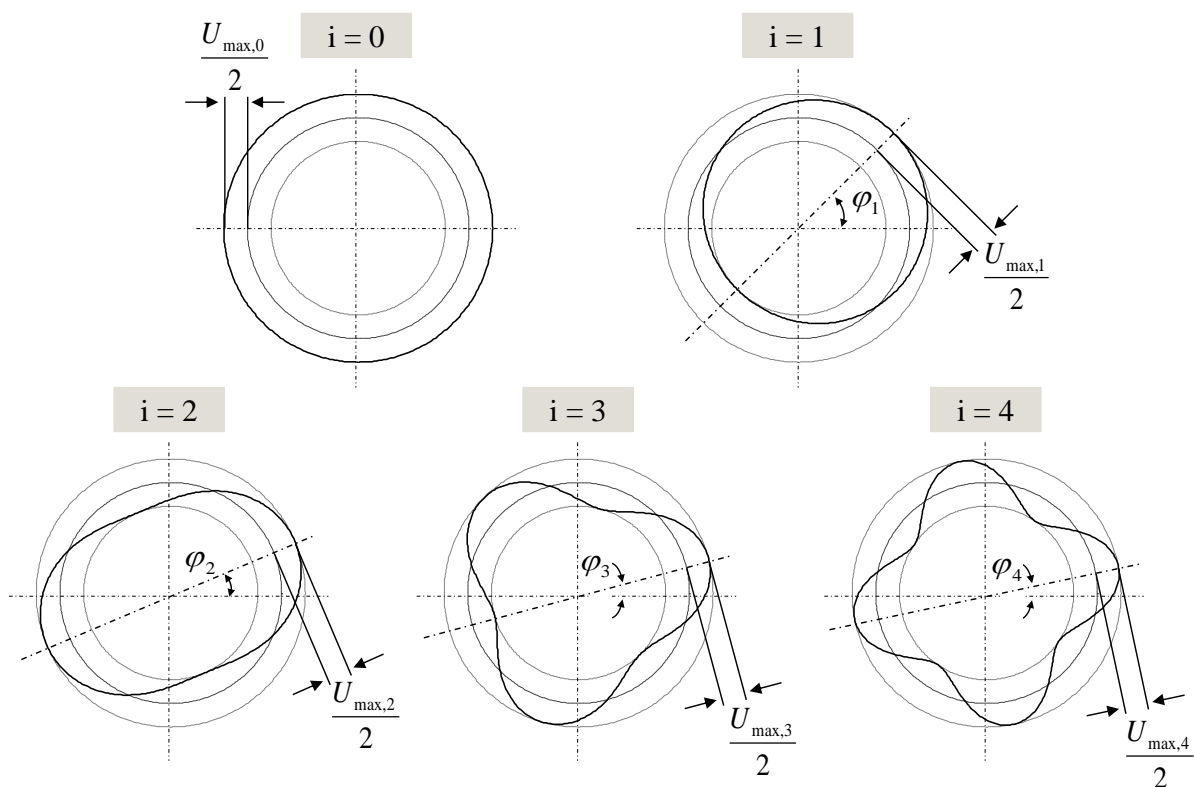


Abbildung 4: Schematische Darstellung harmonischer Fourierordnungen nach Kuhn [125] und Wiens [262]

Da es bei der Erfassung der Zylinderform zu Schiefstellungen der Messachse bezogen auf die Zylinderachse kommen und die gemessene Bohrung ebenfalls einen Formanteil 1. Ordnung (Schiefstellung, Bananenform, S-Schlag, etc.) aufweisen kann, muss die 1. Harmonische messtechnisch miterfasst werden [262].

Nach [35] und [36] wird ein nach der Methode der kleinsten Abweichungsquadrate (LSCI – Least Square Circle) rechnerisch ermittelter Referenzkreis mit dem mittleren Radius r_m in das Rundheitsprofil einer horizontalen Schnittebene integriert. Bei einer kompletten Zylinderformmessung werden in mehreren Zylinderhöhen Rundheitsmessungen durchgeführt, wobei

der so erfassten Zylinderform ein Referenzzylinder der kleinsten Abweichungsquadrate (LSCY – Least Square Cylinder) zugeordnet werden kann [37, 38]. Dabei müssen die mittleren Radien r_m sowie die Mittelpunkte $MP_{LSC,m}$ der Referenzkreise nicht mit dem Radius r_{Ref} und der Referenzachse A_{Ref} des Referenzzylinders übereinstimmen.

2.1.4 Auswirkungen der Zylinderverzüge auf das tribologische System

Die Interaktion der Reibpartner Kolben, Kolbenringe, Zylinderlaufbahn und Schmiermittel im tribologischen System beeinflusst maßgeblich das Funktionsverhalten des befeuerten Motorbetriebs. Ein größerer Verlust an Arbeitsgas (Blow-by) [105], vermehrter Ölverbrauch [83, 92, 148, 235], erhöhte Reibung und Verschleiß [1, 51, 111] konnten als Folge von zu starken Zylinderverzügen nachgewiesen werden.

Blow-by:

Überschreiten die Zylinderverzüge das Formfüllvermögen der Kolbenringe, so können Anteile des Verbrennungsgemischs aufgrund der verminderten Abdichtqualität an den Kolbenringen vorbei strömen. Dieser Verlust an Arbeitsmedium wird im Allgemeinen als Blow-by bezeichnet und tritt in zwei Strömungsrichtungen auf; einerseits zu Zeiten hohen Brennraumdrucks in Richtung Kurbelwelle (Blow-by), andererseits erfolgt ein Reverse-Blow-by in Richtung Brennraum bei gleichzeitig niedrigem Brennraumdruck.

Ölverbrauch:

Die Aufgabe des Ölabstreifringes ist es, die Schmierung von Kolben sowie der Kolbenringe sicherzustellen. Gleichzeitig sollte der Ölverbrauch aus Gründen der Abgasqualität, Partikelemissionen und Kosten so niedrig wie möglich gehalten werden [1]. Die Untersuchungen [83, 92, 148, 235] zeigen, dass die auftretenden Zylinderverzüge den Ölverbrauch maßgeblich beeinflussen. Neben der reinen Verzugsamplitude ist hierbei auch die Art bzw. Ordnung der Deformationen ausschlaggebend; so verursachen höherfrequente Ordnungen (Kleeblattverzug) einen größeren Ölverbrauch als beispielsweise Ovalverzüge. In der Literatur [80, 105, 122, 262] werden dabei diverse Möglichkeiten des Schmierölübertritts vom Kurbel- in den Brennraum beschrieben:

- Durch die ölfilmregulierende Wirkung der Kolbenringe wird der im Abwärtshub auf der Zylinderwand zurückbleibende Ölfilm im darauffolgenden Aufwärtshub vom 1. Kompressionsring teilweise aufgenommen und in den Brennraum gefördert.
- Burnett [19] und Inoue [102] messen dem Reverse-Blow-by eine große Bedeutung im Hinblick auf den Ölverbrauch von Verbrennungsmotoren zu. Bei diesem Vorgang

wird in den Zeitintervallen niedrigen Brennraumdruckes Motoröl durch das rückströmende Blow-by durch den Ringstoßspalt des 1. Kompressionsrings in die Brennkammer gefördert. Die sich innerhalb des Ringsystems befindenden Gase werden mit Öl gesättigt und gelangen durch den Ringstoßspalt sowie die Ringdynamik in die Brennkammer. Blow-by-Strömungen in Richtung Kurbelraum transportieren ebenfalls Öl, wirken sich aber aufgrund der entgegengesetzten Strömungsrichtung mindernd auf den Motorölverbrauch aus. Dies führt vor allem bei niedrigen Drehzahlen und Lasten zu einer Anreicherung des Öls mit Luft-Kraftstoff-Gemisch [162].

- Kawahara et al. [110] beschreiben zudem den Vorgang des Ölverlusts durch Verdampfung. Ein Teil des im Abwärtshub auf der Zylinderlauffläche zurückbleibenden Ölfilms verdampft bei Kontakt mit dem heißen Verbrennungsgas. Die Verdampfungsmenge hängt dabei in hohem Maß von den anliegenden Temperaturen sowie der Ölfilmdicke ab. Eine Zunahme der Verdampfungsrate folgt aus einer Vergrößerung der Ölfilmdicke, welche durch die Art und Ausprägung der Zylinderdeformationen beeinflusst wird.

Eine pauschale Aussage zur Dominanz der einzelnen Ölverbrauchsmechanismen kann nicht getroffen werden, da diese von Faktoren wie Motorbauart, Betriebspunkt, Verbrennungstemperatur, Motoröleigenschaften (z. B. Additivierung, Viskosität), Kolben- und Kolbenringeigenschaften sowie –geometrien beeinflusst werden.

Reibung und Verschleiß [105]:

Abhängig von Druck, Temperatur, Ölfilmdicke und Kolbengeschwindigkeit treten diverse Reibungszustände im System Kolbengruppe / Zylinderlaufbahn auf (siehe Abbildung 5). Einen enormen Einfluss auf den Verschleiß haben die Bereiche an den Umkehrpunkten (OT = oberer Totpunkt, UT = unterer Totpunkt) des Kolbens, da sich hier die Kolbengeschwindigkeit und somit auch die Relativgeschwindigkeit zwischen Kolben und Laufbahn reduziert und kurzzeitig Null beträgt. Diese Reduktion der Relativgeschwindigkeit bewirkt eine Abnahme der Schergeschwindigkeit (siehe Abbildung 5) im Öl sowie der Schmierfilmdicke, wodurch deren Tragfähigkeit rapide abnimmt und es zu Misch- bzw. Grenzreibung kommt. Steigt hingegen die Kolbengeschwindigkeit bzw. die Drehzahl an, so bildet sich gemäß Abbildung 5 aufgrund größerer Schergeschwindigkeiten im Schmiermittel ein dickerer Ölfilm im Kontakt aus. Da die Schmierfilmdicke nur mit der Wurzel der Geschwindigkeit steigt, nehmen die Schergeschwindigkeit und die hydrodynamische Reibung (trotz des wachsenden Schmierpalts) zu. Bei einer Optimierung des Gesamtsystems werden eine möglichst geringe Reibung

sowie Verschleiß angestrebt. Weiterhin ist darauf zu achten, dass Mischreibungsanteile minimiert und die hydrodynamische Reibung begrenzt werden [101].

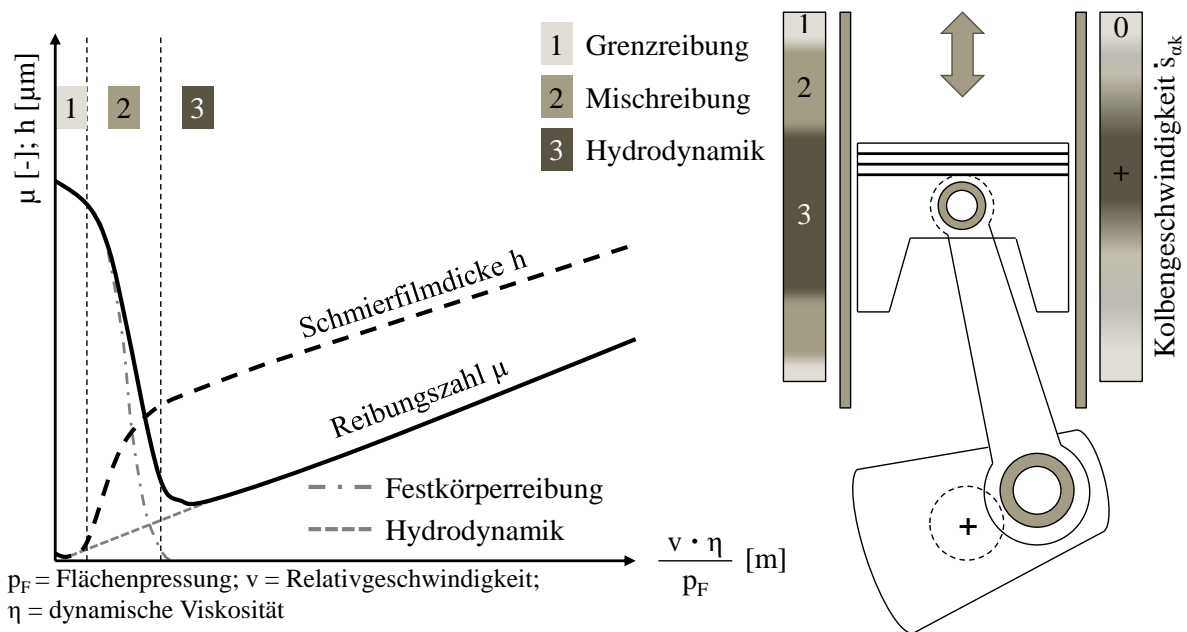


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Stribeckkurve inkl. der Reibungszustände und Schmierfilmdicke nach [93, 120, 249]

Die Schmierfilmdicke h beeinflusst das Tribosystem Pleuellagergruppe / Zylinderlaufbahn. Die Schmierfilmdicke h nimmt mit steigender Pleuellagerbolzenvorspannung ab (siehe Abbildung 6). Dabei kommt es zu einem Anstieg der Mischreibungskräfte und –anteile sowie der hydrodynamischen Reibkräfte. Die hydrodynamischen Reibkräfte steigen dabei proportional zur Wurzel der Flächenpressung, wodurch auch die Schergeschwindigkeit im dünneren Ölfilm anwächst [105, 213]. Entsprechend Abbildung 5 führt dies dazu, dass der Reibkoeffizient (Quotient aus Reibkraft und Normalkraft) proportional zur Wurzel der Flächenpressung abnimmt.

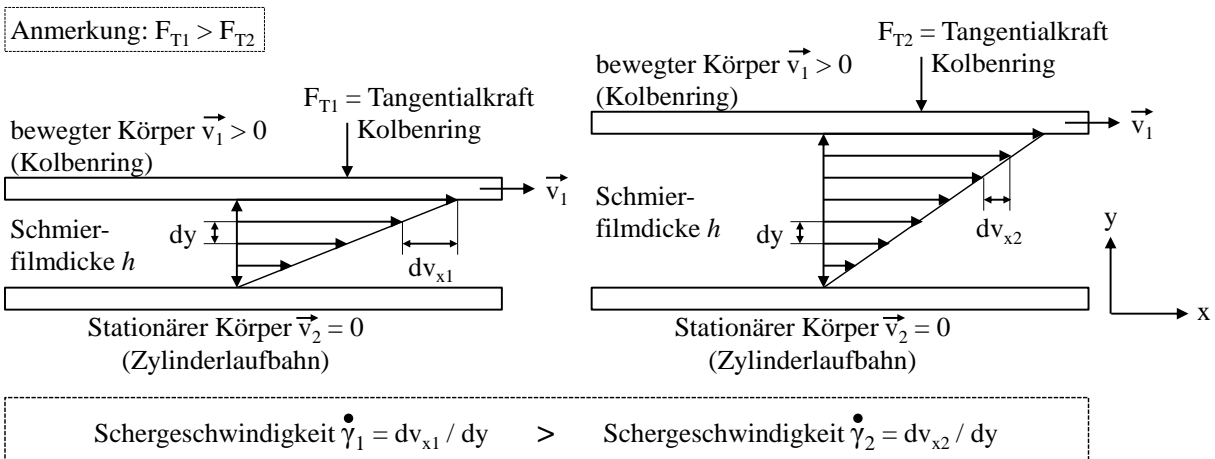


Abbildung 6: Schergeschwindigkeit nach [32]

Nach Halsband [91] und Ma et al. [134] gilt dies sowohl für Kompressionsringe sowie den Ölabstreifring, wobei Halsband seine Aussagen durch Messungen belegt, wohingegen Ma et al. sich auf Rechnungen berufen. Ma et al. führen weiterhin auf, dass durch die Zylinderdeformationen und den damit verbundenen, größeren Ölfluss aufgrund der verminderten Abdichtwirkung des Ringpakets die Ringreibung bis zu einem gewissen Maß abnehmen kann. Allerdings verursacht dieses verbesserte Ölangebot einen Anstieg des Ölverbrauchs. Gleichzeitig sinkt die minimale Ölfilmdicke mit wachsender Deformation, was sich an den Stellen minimalen Abstands zwischen Kolben / Kolbenring und Zylinderlaufbahn nachteilig auf den Verschleiß auswirken kann. Chu Suy [21] und Pischinger [212] belegen diesen Effekt und zeigen zugleich dessen Verstärkung durch den Zünddruck auf.

Zusätzlich zur Kolbenringreibung spielt die Kolbenhemdreibung eine besondere Rolle. Neben lokaler Kolbengeschwindigkeit, Kolbengeometrie, Kolbenwerkstoff (inkl. Kolbenhemdbeschichtung), Desaxierung und Einbauspiel kommt es aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnung von Zylinderbohrung und Kolben im befeuerten Motorbetrieb zu lokal unterschiedlicher Kolbenhemdreibung. Bedingt durch die Verbrennungstemperaturen heizt sich der Kolben höher auf als der untere Teil der Zylinderbohrung. Dies führt dazu, dass in diesem Bereich der Schmierspalt zwischen Kolbenhemd und Zylinderlaufbahn schrumpft und es zu einer Erhöhung der Mischreibungsanteile und des Kolbenhemdverschleißes kommen kann.

Ausgleich der Zylinderdeformationen durch das Ringpaket:

Die Zylinderverzüge müssen mittels des Anschmiegeverhaltens der Kolbenringe (in der Literatur Formfüllvermögen [255] genannt) kompensiert werden. Das Formfüllvermögen von Kolbenringen beschreibt deren Eigenschaft sich auch nicht-zylindrischen Bohrungsgeometrien anpassen zu können [162]. Ein hohes Formfüllvermögen unterstützt damit die funktionsgerechte Abdichtung eines Zylinders gegen Verbrennungsdruck, -gas und Motoröl [255].

Nach Mierbach [147] und Tomanik [251] bedarf es für die genaue Berechnung des Formfüllvermögens U_{KR_max} aufwändiger FEM- Simulationen, welche Systemeigenschaften wie z. B. Ringstoß, Gaskraft, Radialversatz und Steifigkeit des Kolbenrings berücksichtigen [251]. Rechnerisch vereinfachte Kriterien (z. B. Vernachlässigung des Ringstoßes) zur quantitativen Bewertung des Formfüllvermögens im Ringrücken eines Rechteckringes werden in der Literatur z. B. von Müller [153], Dunajevski [49] und Tomanik [251] beschrieben (Tabelle 1).

Tabelle 1: Kriterien zur quantitativen Bewertung des Formfüllvermögens von Kolbenringen [174]

Kriterium von:	Maximal mögliche Durchmesser-Amplitude je Fourierordnung	Formfüll-Koeffizient des Kolbenrings
Müller	$U_{Kr_max} = \frac{2K_{Kr}r}{(i^2 - 1)^2}$	(10)
Dunajevski	$U_{Kr_max} = \frac{2K_{Kr}r}{3(i^2 - 1)}$	(11)
Tomanik	$U_{Kr_max} = \frac{K_{Kr}r}{10(i^2 - 1)}$	(12)
Mit	$K_{Kr} = \frac{F_t r^2}{EI}$ (13) (einheitslose Konstante, welche die Werkstoffeigenschaften des Kolbenrings berücksichtigt)	
	i = harmonische Ordnung der Deformation F _t = Tangentialkraft r = Kolbenringradius E = Elastizitätsmodul des Kolbenrings I = Flächenträgheitsmoment des Kolbenrings	

Anhand der in Tabelle 1 genannten Formeln zeigt sich, dass das Formfüllvermögen der Kolbenringe mit steigender Ordnungszahl i exponentiell abnimmt. Eine Verbesserung des Formfüllvermögens U_{Kr_max} bei gleichbleibenden Zylinderdurchmessern r sowie Werkstoffeigenschaften des Kolbenrings (E , I) kann lediglich durch eine Erhöhung der Tangentialkraft F_t erzielt werden. Eine reibungs- und ölverbrauchsoptimale Verbrennung mit reduzierter Tangentialkraft F_t (Ringvorspannung) kann somit nur erfolgen, wenn die Zylindergeometrie während des Verbrennungsvorgangs möglichst wenig von der idealen Zylinderform abweicht. Dies gilt entsprechend Tabelle 1 insbesondere für Deformationsanteile höherer Fourierordnung i .

Die in diesem Kapitel dargestellten Grundlagen verdeutlichen den Zielkonflikt zwischen Reibungs- und Ölverbrauchsoptimierung sowie des eingeschränkten Formfüllvermögens der Kolbenringe. Dies führt zu dem Schluss, die makrogeometrische Betriebskontur der Zylinderbohrung zu optimieren oder die Zylinderverzüge über konstruktive Maßnahmen zu minimieren. Diese beiden Lösungsstrategien können auch miteinander kombiniert werden. Berberich [5, 7, 202] und Spitznagel [246] greifen die Idee der Funktionsoptimierung durch fertigungstechnischen Vorhalt der auftretenden Deformationen bereits auf, wobei jedoch kein konkreter Lösungsansatz umgesetzt wird. Wiens [262, 264–266] sowie die Offenlegungs- und Patentschriften [177, 181, 194, 196, 203–205, 210], liefern hierzu bereits Lösungskonzepte für das

Formhonen von Zylinderlaufbahnen (siehe Kapitel 2.4). Diese sind jedoch unzureichend erforscht, ebenso fehlt deren Eignungsnachweis für thermische Spritzschichten. Spitznagel [246] zeigt für das Formhonen inkl. Anpassung des Kolbenschliffbildes sowie der Ringvorspannung ein rechnerisches CO₂-Einsparpotential von ca. 1,0 % bis 1,5 % gegenüber einem Referenzmotor auf. Dollinger [45] hingegen nennt für eine konisch gehonte Bohrung ein CO₂-Einsparpotential von ca. 1 g CO₂/km für einen V6-Motor im NEFZ-Zyklus. Das prognostizierte CO₂-Einsparpotential von Formhontechnologien liegt damit im Mittel über dem einer reinen Topographie- und Werkstoffanpassung bei gleichbleibender zylindrischer Honung. Schleif [225] zeigt, dass der Einfluss von Laufbahnwerkstoff und Honstruktur auf die Reibung unter Kaltstartbedingungen bei zylindrischen Honungen gering ist. Weiterhin wird aufgeführt, dass Werkstoff- und Honstrukturvariationen in einzelnen Kennfeldbereichen Reibungsvorteile gegenüber einer definierten Referenzvariante aufweisen.

2.2 Zylinderlaufbahntechnologien von Verbrennungsmotoren

Es werden Konzepte und Entwicklungstrends moderner Laufbahntechnologien dargestellt. Das dieser Arbeit zugrunde liegende Verfahren des Lichtbogendrahtspritzens wird ebenso wie dessen Schichtbildung erläutert.

2.2.1 Konzepte und Entwicklungstrends von Laufbahntechnologien

Die in einem Motor eingesetzte Zylinderlaufbahntechnologie hat maßgeblichen Einfluss auf die Motorfunktion sowie dessen Lebensdauer. Abbildung 7 zeigt eine Übersicht gängiger Kurbelgehäuse-Ausführungen sowie Laufflächentechnologien.

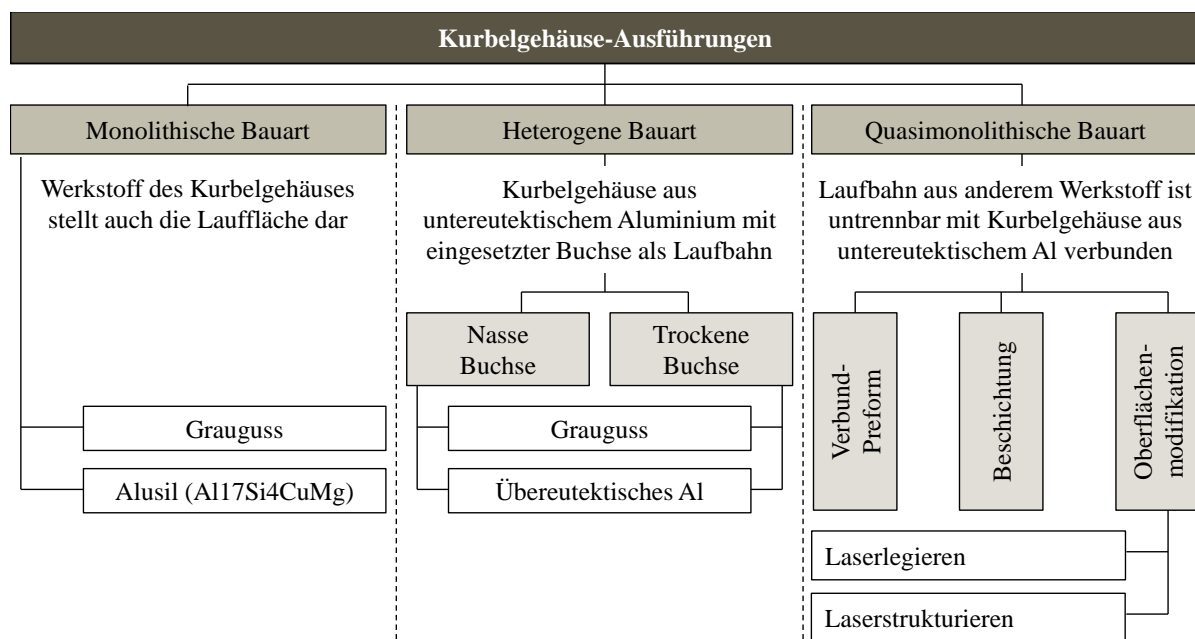


Abbildung 7: Übersicht Zylinderlaufbahntechnologien sowie deren Einteilung [255]

Bei einer monolithischen Kurbelgehäusebauart kommen als Grund- und Laufbahnwerkstoff üblicherweise Grauguss (GG) oder übereutektisches Aluminium (Al) zum Einsatz. Trotz guter tribologischer Eigenschaften von Grauguss-Kurbelgehäusen bei denen der eingelagerte Graphit als Festschmierstoff fungiert (GJL, GJV, GJS), werden aufgrund der Forderung nach Leichtbaumaßnahmen vermehrt Aluminium-Kurbelgehäuse im Automobilbereich eingesetzt [8]. Neben der gängigen übereutektischen Al-Si-Legierung ALUSIL[®], bei welcher die ausgeschiedenen Silizium-Kristalle mechanisch oder chemisch freigelegt und anschließend als Lauffläche verwendet werden [64, 117, 119, 228, 229, 255], existieren Forschungsprojekte zur Weiterentwicklung von Al-Si-Legierungen [271].

Übereutektische Al-Si-Legierungen (z. B. ALUSIL[®]) sind aufgrund der hohen Material- und Bearbeitungskosten weniger wirtschaftlich [255], weshalb Leichtmetallkurbelgehäuse aus untereutektischen Al-Si-Legierungen zumeist heterogen oder quasimonolithisch ausgeführt

werden. Somit können die leicht bearbeitbaren Kurbelgehäuse mit hochleistungsfähigen Laufbahntechnologien wie Graugussbuchse oder pulvermetallurgisch hergestellten Al-Si-Buchsen (SILITEC[®]) [113, 124] versehen werden. Der Einsatz von günstigen, leicht bearbeitbaren und tribologisch vorteilhaften Graugussbuchsen erfordert jedoch hohe Stegbreiten (hohes Gewicht) und verschlechtert die Wärmeabfuhr vom Brennraum in den Grundwerkstoff [76, 219, 237]. Dies führt nicht zuletzt wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit der GG-Buchsen zu hohen Zylinderverzügen, die sich nach Kapitel 2.1.4 nachteilig auf die Motorfunktion auswirken. Die oben beschriebenen Nachteile, welche durch die Anwendung von GG-Buchsen entstehen, können durch die Anwendung von sogenannten LOKASIL[®]-Preforms gemindert werden. Dabei handelt es sich um hochporöse, zylindrische Si-Hohlformkörper, die im Gießverfahren mit Aluminium infiltriert werden und dadurch einen Stoffschluss mit guten tribologischen Eigenschaften besitzen; gegenüber den konventionellen Buchsenkonzepten weisen sie höhere Kosten auf [118].

Weitere Laufbahntechnologien wie die Anodische Oxidation unter Funkenentladung [223] oder das Laserlegieren [62, 79] wirken auf die oberflächennahe Schicht des Al-ZKG-Grundwerkstoffs, wodurch eine Lauffläche mit tribologisch günstigen Eigenschaften entsteht. Nach Schattauer [223] bildet sich bei der Anodischen Oxidation hauptsächlich eine Al_2O_3 keramische Konversionsschicht im μm -Bereich aus. Diese Schicht zeichnet sich trotz einer geringen Wärmeleitfähigkeit durch eine hohe Härte, Verschleißbeständigkeit und Korrosionsbeständigkeit aus. Der beim Laserlegieren (TRIBOSIL[®]) verwendete untereutektische Al-Si-Grundwerkstoff wird in den randnahen Schichten mittels eines Lasers aufgeschmolzen und unter Zugabe eines Pulvers aufgelegt. Dadurch entsteht ein übereutektischer Laufbahnwerkstoff mit hoher Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit, welcher bezogen zur GG-Buchse deutlich geringere Zylinderdeformationen im Motorbetrieb aufweist [62, 244]. Als nachteilig bei diesem Laufbahnkonzept sind jedoch die hohen Anlagen- und Energiekosten zu bewerten [237].

Neben den bisher beschriebenen Laufbahntechnologien existieren diverse thermische und galvanische Beschichtungsverfahren, die durch ihre gute Anbindung an das Substrat zumeist eine sehr gute Wärmeabfuhr von der Zylinderlaufbahn zum ZKG-Grundkörper aufweisen. Ein weiterer Vorteil dieser Schichtsysteme ist ihre geringe Schichtdicke, welche kombiniert mit dünnen Stegbreiten, die Forderung nach Leichtbau im Antrieb erfüllt. Hinsichtlich thermischer Beschichtungsverfahren finden sich in der Literatur einzelne Forschungsvorhaben, die sich mit der Untersuchung von PVD- und CVD-Schichten als Zylinderlaufbahntechnologie

befassen [142, 217]. Die für die Herstellung benötigten sehr hohen Bauteiltemperaturen und damit verbundenen Kosten ermöglichen derzeit noch keinen Serieneinsatz [79].

Die galvanische Hartchrom-Laufflächenbeschichtung (CROMAL[®]) wird aufgrund ihrer hohen Härte in tribologischen Systemen mit besonders hoher Verschleißanforderung eingesetzt [137]. Die unter ihrem Markennamen NIKASIL[®] vertriebene Nickeldispersionsschicht weist ebenfalls eine gute Verschleißbeständigkeit auf und beruht auf bis 3 μm großen Silizium-Carbid-Partikeln (SiC), welche in einer Nickelmatrix eingebettet sind [65, 137]. Die geringe Abscheidungsrate von ca. 3 $\mu\text{m}/\text{min}$ führt bei einer Schichtdicke von ca. 75 μm zu recht langen Taktzeiten. Es werden zudem hohe Qualitätsanforderungen an die Laufbahnoberfläche vor dem Beschichtungsprozess gestellt. Daher findet diese Technologie lediglich in der Kleinserienfertigung wie im Rennsport ihre Anwendung [65, 117]. Galvanisch abgeschiedene Eisenbeschichtungen auf Zylinderlaufbahnen zeichnen sich nach [149, 150] ebenfalls durch gute tribologische Eigenschaften und gegenüber Aluminiumlaufbahnen mit etwas niedrigerer Reibung aus.

In der Automobilindustrie stellen thermische Spritzschichten den derzeitigen Schwerpunkt bei der Entwicklung moderner Laufflächenkonzepte dar. DIN 657 [34] definiert diese als „Verfahren, bei denen Spritzzusätze innerhalb oder außerhalb der Spritzpistole zugeführt und bis zum plastischen oder geschmolzenen Zustand aufgeheizt und dann auf die vorbereitete Oberfläche geschleudert werden; die Oberfläche wird dabei nicht aufgeschmolzen“. Dabei werden gegenwärtig am häufigsten das Flammsspritzen, Plasmaspritzen, Hochgeschwindigkeitsspritzen sowie das Lichtbogenspritzen industriell verwendet [2]; insbesondere High-velocity oxygen fuel (HVOF), atmosphärisches Plasmaspritzen (APS), Plasma-transferred wire arc (PTWA) und das Lichtbogendrahtspritzen (LDS) haben sich bei den Original equipment manufacturers (OEMs) sowie den Automobilzulieferern durchgesetzt [20, 44, 50, 79, 238, 240, 248, 272]. Weiterführende Informationen zu den Verfahren finden sich in der Literatur beispielsweise auch unter [18, 133, 237, 245, 250]. Generelle Vorteile der thermischen Spritzverfahren sind nach [2] die Flexibilität in Bezug auf die Werkstoffauswahl und Schichtdicke (Gewicht), die niedrigen Substrattemperaturen und Prozesszeiten, die tribologisch guten Eigenschaften sowie eine reduzierte Gefahr von Zylinderverformungen [93]. Das HVOF-Verfahren ermöglicht hohe Haftfestigkeiten größer 80 MPa nach EN582 [161] sowie geringe Schichtporositäten. Allerdings ermöglicht es der große und komplexe Brenner nicht, dass dieser in die Bohrung eintaucht, wodurch es aufgrund des unterschiedlichen Auftreffwinkels der Spritzpartikel zu lokal unterschiedlichen Schichteigenschaften kommt [77]. Das PTWA-

Verfahren zeichnet sich vor allem durch eine sehr homogene Schichtausprägung mit geringer Porosität aus [257], wohingegen das LDS-Verfahren durch poröse und inhomogene Schichten gekennzeichnet ist. Weiterhin kommt es hier zum Abbrand einiger Legierungselemente, wie C, Mn oder Cr [2]. Das LDS-Verfahren eignet sich gegenüber alternativen Spritzverfahren allerdings deutlich besser für einen Großserienbetrieb und zeichnet sich überdies durch geringe Prozesskosten und Standzeiten aus [238]. Nach [11] besteht beim Lichtbogendrahtspritzen die Möglichkeit der Verwendung von Fülldrähten zur Herstellung von Schichten mit nanokristallinen Randbereichen, die zur Optimierung des tribologischen Systems beitragen. Schleif [227] schlägt hier mögliche Legierungselemente wie Bronzen oder Wolfram sowie eine Variation des Kohlenstoffanteils vor. Eine der Herausforderungen liegt jedoch in der mechanischen Fertigbearbeitung – dem Honen – der thermischen Spritzschichten (siehe Kapitel 2.3).

2.2.2 Lichtbogendrahtspritzen: Verfahren und Schichtbildung

Die untereutektischen Aluminiumgehäuse werden gegossen, wärmebehandelt und mechanisch bearbeitet, wobei der Einbringung von sogenannten Indexbohrungen eine bedeutende Rolle zu Teil wird. Diese ermöglichen eine genaue Positionierung bzw. Aufnahme des Kurbelgehäuses für die nachfolgenden Prozessschritte, wodurch die definierten Form- und Lagevorgaben erreicht werden können [237]. Im Anschluss an diesen Fertigungsschritt erfolgt die Oberflächenaktivierung mittels Strahlverfahren [78, 267], die Aufbringung einer chemischen Haftschiicht [75, 245], die Vorbehandlung mittels Lasertechnologie [22, 200, 201, 206] oder ein mechanisches Aufräumen durch Zerspanen [188, 189, 195, 197–199, 207, 208]. Dieser Prozessschritt ist qualitätsentscheidend, da hier die Funktionalität bzw. die Haftfähigkeit der Spritzpartikel am Substrat bestimmt wird [237, 238]. Neben der Adhäsion und einzelnen Diffusionsvorgängen stellt die mechanische Verklammerung den vorrangigen Mechanismus der Schichtanhaftung dar [108, 133, 259].

Entsprechend Abbildung 8 werden beim LDS-Verfahren zwei eisenbasierte Drähte über separate Führungseinheiten in Kontakt gebracht, wobei es aufgrund eines anliegenden elektrischen Potentials im Kontaktbereich zu einem Kurzschlussstrom kommt. Dieser Kurzschlussstrom mit einer Stromdichte von $> 100 \text{ A/mm}^2$ [238] bewirkt ein Aufschmelzen der Drähte, was zu Flüssigkeitströpfchen führt. Mittels eines Zerstäubergases werden diese beschleunigt und treffen mit hoher Geschwindigkeit auf die aktivierte Oberfläche. Aufgrund ihrer gespeicherten kinetischen Energie und Kapillarwirkung dringen die Tröpfchen in die Hinterschneidungen des Trägermaterials ein, wo sie aufgrund des Temperaturgefälles zum Grundwerkstoff im μs -Bereich erstarren. Die so entstandene formschlüssige Verbindung führt in Kombination mit

einer adhäsiven und kraftschlüssigen Komponente aufgrund von Schrumpfspannungen an den Rauheitsspitzen zur Schichtanhaftung [133]. Die gespritzte Schicht zeichnet sich durch einen lageweisen und lamellaren Aufbau aus, welcher zusätzlich durch eine verfahrensbedingte Porosität gekennzeichnet ist. Diese ist im Vergleich zu anderen Spritzverfahren, bedingt durch die niedrigeren Temperaturen und höhere Teilchengröße, leicht erhöht [58]. Nach [133] entstehen weiterhin sogenannte Aufbauporositäten, die ihren Ursprung in nicht gänzlich aufgeschmolzenen Teilchen haben. Sie dienen als Mikrokammern / Ölreservoirs und bilden somit ein indirekt kommunizierendes Schmiersystem.

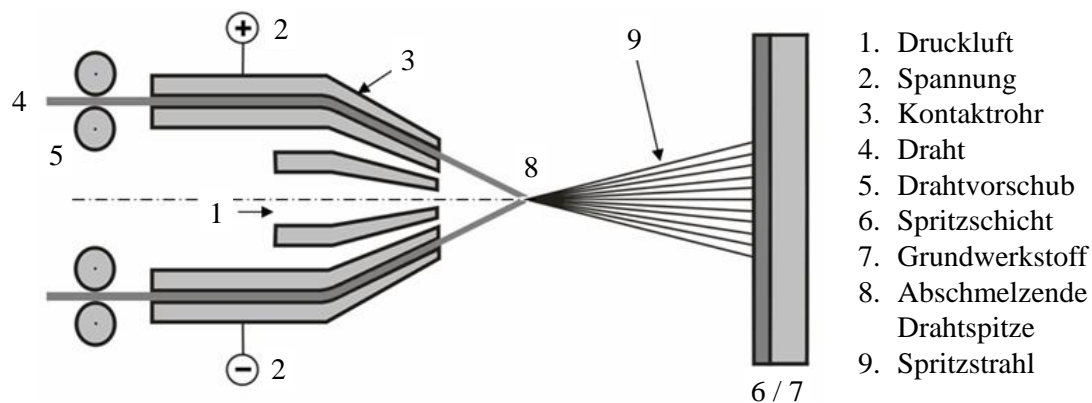


Abbildung 8: Thermisches Spritzen – Schematische Darstellung nach [34]

Die variabel wählbare Schichtdicke beträgt nach Steinparzer et al. [248] bei dem von der BMW Group im Jahre 2011 in Serie gebrachten Reihen-4-Zylinder Ottomotor im Kernbereich ca. 0,3 mm. Der Kernbereich der LDS-Schicht wird hier definiert als minimale Schichtdicke, ohne Berücksichtigung der Anlagerung von Overspray (Fähnchen), welches sich wie Spitzen auf der Basisschicht aufbaut. In einem mehrstufigen Honprozess werden ca. 60 % bis 70 % der Schichtdicke zerspan, um die finale Funktionsfläche zu erzeugen [238]. Weiterhin ist die von BMW eingesetzte LDS-Schicht nach Hannemann [93] durch einen Porenflächenanteil von ca. 8 % (gemessen im Querschliff) und einer Lamellendicke von ca. 5 µm bis 40 µm gekennzeichnet. Analysen der Element- und Phasenzusammensetzung [10, 11, 89, 227] zeigen bei thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen – bedingt durch den schnellen Erstarrungsprozess – einen hohen Martensitanteil und amorphe, ternäre Oxid-Phasen zwischen einzelnen Lamellenschichten, deren Hauptbestandteile Eisen und Sauerstoff bilden. Die durch den hohen Martensitanteil hervorgerufene sehr hohe Mikrohärtigkeit der Schicht erschwert neben ihrer Porosität und Lamelligkeit den nachfolgenden Zerspanprozess (Hon) und wirkt sich abrasiv auf die Honleistenbindung aus [237].

2.3 Zylindrisches Honen von Zylinderlaufbahnen

Im folgenden Kapitel wird die Technologie des Honens erläutert. Der Fokus liegt dabei auf der Auswirkung der Einstellparameter auf das Honergebnis, dem Honen thermischer Spritzschichten sowie der Beurteilung zylindrisch gehonter Zylinderlaufbahnen.

2.3.1 Definition und Wirkung der Einstellparameter auf das Honergebnis

Honen ist nach DIN 8589 Teil 14 [33] definiert als ein spanendes Verfahren „mit geometrisch unbestimmten Schneiden, wobei die vielschneidigen Werkzeuge eine aus zwei Komponenten bestehende Schnittbewegung ausführen, von denen mindestens eine Komponente hin- und hergehend ist, so dass die bearbeitete Oberfläche auch definiert überkreuzende Spuren aufweist.“ Der Überschneidungswinkel (Honwinkel) der sich überkreuzenden Spuren zeigt somit das Verhältnis aus der axialen Komponente v_H (Hubgeschwindigkeit) sowie der tangentialen Schnittgeschwindigkeitskomponente v_t (Umfangsgeschwindigkeit).

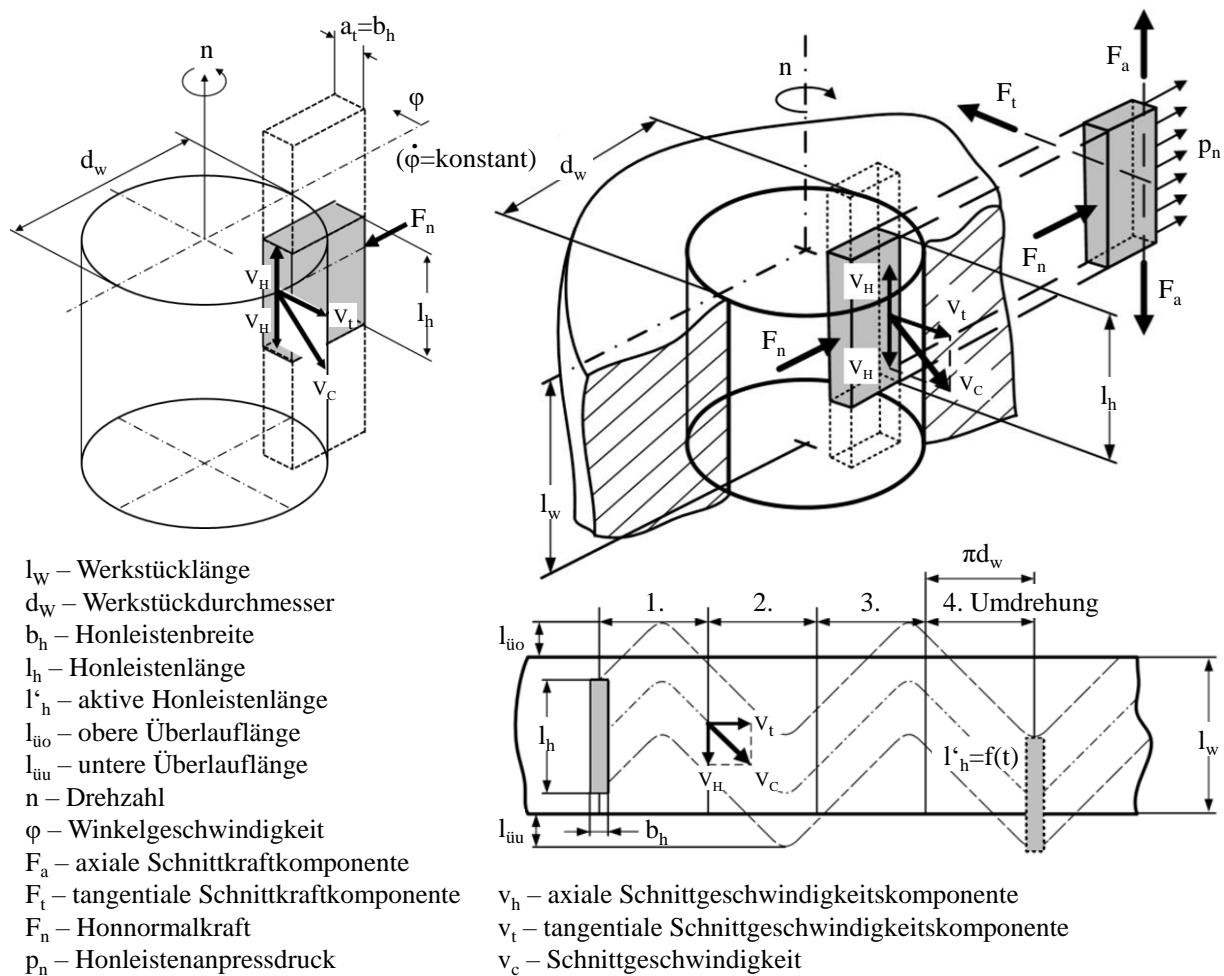


Abbildung 9: Darstellung der Kinematik und Begriffsbestimmungen des Honens [155]

Abbildung 9 zeigt die Kinematik des Innenrundhons nach Mushardt [155] inkl. der Kontaktzeit t_k , mit welcher die verwendeten Schneidelemente auf die bearbeiteten Flächenelemen-

te der Zylinderlauflfläche einwirken. Die Kontaktzeit t_k kann nach Mushardt [155] als Funktion der Bohrungslänge l_w , den Überlauflängen $l_{üo}$ und $l_{üu}$ sowie den kinematischen Honprozessparametern beschrieben werden.

Die Spanbildung beim Honen wird in verschiedenen Theorien beschrieben. Martin [138, 139] beschreibt sie als Ermüdung plastisch verformten Werkstückwerkstoffs vor der Schneidkornschnittkante und damit verbundener Furchenbildung und Materialverdrängung. In Abhängigkeit der Schneidkorngemetrie finden nach Flores [65] unterschiedliche Zerspanvorgänge statt. Demnach pflügen spitze Körner den Werkstoff auf und trennen ihn mittels der scharfkantigen Flanken ab, wohingegen stumpfe Schneidkörner breitere Honriefen hinterlassen. Die optischen Messungen von Maskus [140] weisen nach, dass aus der Honleistenbindung ausgebrochene Schneidkörner ebenfalls am Zerspanvorgang beteiligt sein können. Zur optimalen Auslegung einer Honleiste hinsichtlich Bindung und Schneidkorn nennen Flores und Hampf [70] einen konstanten, durch Selbstschärfung regulierten Kornüberstand von ca. 1/3 der Korngröße.

Mittels Honen, welches typischerweise am Ende der Fertigungskette angesiedelt ist, werden Form, Maßgenauigkeit und Oberflächengüte des Werkstücks maßgeblich verbessert bzw. nach den Sollvorgaben eingestellt [115]. Für den speziellen Fall der mechanischen Fertigung von Zylinderkurbelgehäusen dient das Honen der Erzeugung von finalen Funktionsflächen mit günstigen Eigenschaften [222], deren Aufgabe nach Flores [65] aus Gleiten, Dichten und Führen besteht. Die Topographieausprägung der fertiggehonten Werkstückoberfläche ist somit von entscheidender Bedeutung und wird nach Klocke [115] durch die Prozesseingangsgrößen bestimmt. Bei den Eingangsgrößen kann demnach zwischen System- und Stellgrößen unterschieden werden. Im Rahmen der immanenten Eigenschaften der häufig festliegenden Systemgrößen Honmaschine, Werkstück, Honwerkzeug und Kühlschmierstoffsystem können die Stellgrößen Axial- und Umfangsgeschwindigkeit, Hubfrequenz und -länge, Anpressdruck und Kontaktlänge des Werkzeugs sowie Zuführdruck und Durchflussmenge des Kühlschmierstoffs definiert werden [115]. Das Zusammenwirken der Eingangsgrößen bestimmt die Prozesskenngrößen Schnittkraft, Leistung, Verschleiß, Temperatur und Prozessdauer und ist verantwortlich für das Arbeitsergebnis hinsichtlich Zerspanmasse, Formgüte und Oberflächenausprägung [115, 262]. Die in der Fachliteratur dargestellten Korrelationen zwischen Ergebnisgrößen und den erfassten parametrisierten Eingangsgrößen beruhen zumeist auf experimentellen Untersuchungen.

Auswirkung der Eingangsgrößen auf die Zerspanleistung

In der Fachliteratur finden sich viele Untersuchungen zur Abhängigkeit der Zerspanleistung von den parametrierbaren Einstellgrößen. So zeigen die Arbeiten von Juchem [106], Saljé [220] und Tönshoff [252] eine lineare Abhängigkeit des Zerspanvolumens vom Honleistenanpressdruck oberhalb eines Schwellwertes von ca. 0,5 MPa.

Juchem [106], Mushardt [154] und von See [243] kommen zu dem Ergebnis, dass eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit eine nichtlineare Erhöhung des Zeitspanvolumens zur Folge hat. Weiterhin zeigt Juchem [106] für unterschiedliche Schneidmittelwerkstoffe zerspanungsoptimale Schnittgeschwindigkeiten. Weitere Untersuchungen von Haasis [86] und Juchem [106] liefern für den Honprozess optimale Honwinkel von 40° bis 75°, welche nach Klocke [115] unabhängig von Korngröße, Anpressdruck sowie Schneidmittel und Bindungsmaterial (Härte) sind.

Flores [65] und Klocke [115] legen eine Abhängigkeit zwischen Honzeit und Zeitspanvolumen Q_w dar. Aufgrund einer vorherrschenden hohen Vorbearbeitungsrauheit kommt es zu Honbeginn zu großen Spanungsquerschnitten an den einzelnen Schneidkörnern, welche in einem hohen temporären Zeitspanvolumen resultieren. Das Zerspanen der Rauheitsspitzen sorgt wiederum für eine Reduktion des Spanungsquerschnittes und führt nach [15, 154, 252, 273] zu einer nicht-linearen Verringerung des Zeitspanvolumens. Nach [243] kann dieser Effekt durch ein Abstumpfen der Honleisten verstärkt werden.

Zettel [273] zeigt in seinen Untersuchungen, dass mit steigender Korngröße eine Erhöhung des Zeitspanvolumens bei gleichzeitiger Minderung des Honleistenverschleißes erfolgt. Weiterhin stellt er den Einfluss der Honleistenbindung auf die Zerspanleistung dar. Eine Erhöhung des Leistenverschleißes bewirkt einen Anstieg des Zeitspanvolumens, ein geringer Leistenverschleiß eine Verringerung des Zeitspanvolumens. Erklärt wird dies durch die hohe Haltekraft eines harten, verschleißarmen Bindermaterials, wodurch die einzelnen Schneidkörner länger in der Bindung verharren und dort abstumpfen. Eine Vergrößerung des Honleistenverschleißes bedingt einen Anstieg des Zeitspanvolumens, da stumpfe Körner schneller aus der Bindung ausbrechen und so ständig neue, scharfe Schneidkörner in den Eingriff kommen. Unterhalb eines gewissen Grenzwertes können die Schneidkörner die Zerspankräfte jedoch nicht mehr aufnehmen und brechen aus der weichen Bindung.

Die experimentellen Untersuchungen von Dröder et al. [46] belegen den Einfluss unterschiedlicher Kühlschmierstoffe auf das bezogene Zeitspanvolumen Q'_w . Gegenüber dem Einsatz

von Honöl konnten mittels einer Emulsion und einer polymerbasierten Lösung signifikant höhere bezogene Zeitspannvolumina erzielt werden. Die erzielten Ergebnisse lassen sich nach [46] und [65] durch die gute Spülwirkung und vergleichsweise geringe Viskosität von Emulsion und Polymerlösung gegenüber Honöl begründen.

Auswirkung der Eingangsgrößen auf die Werkstückform

Beim Honen von Zylinderkurbelgehäusen kann es aufgrund von Reibungs- und Steifigkeitseinflüssen am Werkzeug sowie durch lokal unterschiedliche Nachgiebigkeiten – bedingt durch die Strukturmechanik des Kurbelgehäuses – am Werkstück zu prozessbedingten, fertigungstechnischen Abweichungen von der beispielsweise zylindrischen Sollform kommen [262]. Tönshoff [252] berichtet von Rundheitsabweichungen 2. Ordnung im obersten Bohrbereich, welche durch eine Kippung des Honwerkzeugs bei hohem Honleistanpressdruck (hoher Axialkraft) entstehen. Dieser Effekt kann zudem durch den Einsatz kurzer Honleisten verstärkt werden.

Die Länge der Honleisten hat ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf die erzeugte Werkstückgeometrie. Während kurze Honleisten der axialen Bohrungsform eher nachlaufen, können längere Leisten bereits enthaltene Formfehler korrigieren und somit die Zylindrizität verbessern [115]. Darüber hinaus können durch die Verwendung von breiten Honleisten Rundheitsfehler (Welligkeiten) eliminiert werden, da diese zu Prozessbeginn zunächst an der Bohrungseingestelle zerspanen. Trotz ihres meist geringen Zeitspannvolumens verhindern Großflächenwerkzeuge die gleichgerichtete Entstehung von Schwingungen [87]. Schmale Honleisten hingegen können den Rundheitsfehlern nachlaufen. Eine zunehmende Anzahl an Honleisten wirkt sich insbesondere beim Honen von Zylinderkurbelgehäusen vorteilhaft auf die erzielte Rundheit aus [65].

Der aus der Hub- und Honleistenlänge resultierende Honleistenüberlauf über die Bohrungsenden beeinflusst die lokale Kontaktzeit sowie den temporären und örtlichen Honleistanpressdruck. Flores [65] empfiehlt zur Erzeugung einer zylindrischen Durchgangsbohrung eine Honleistenlänge l_h von ca. $2/3$ der Bohrungslänge l_w sowie einen unteren und oberen Honleistenüberlauf von etwa $1/3$ der Honleistenlänge l_h . Abbildung 10 zeigt die Zusammenhänge von Honleistanpressdruck, Kontaktzeit sowie den Einfluss des Honleistenüberlaufs auf die resultierende Bohrungsform.

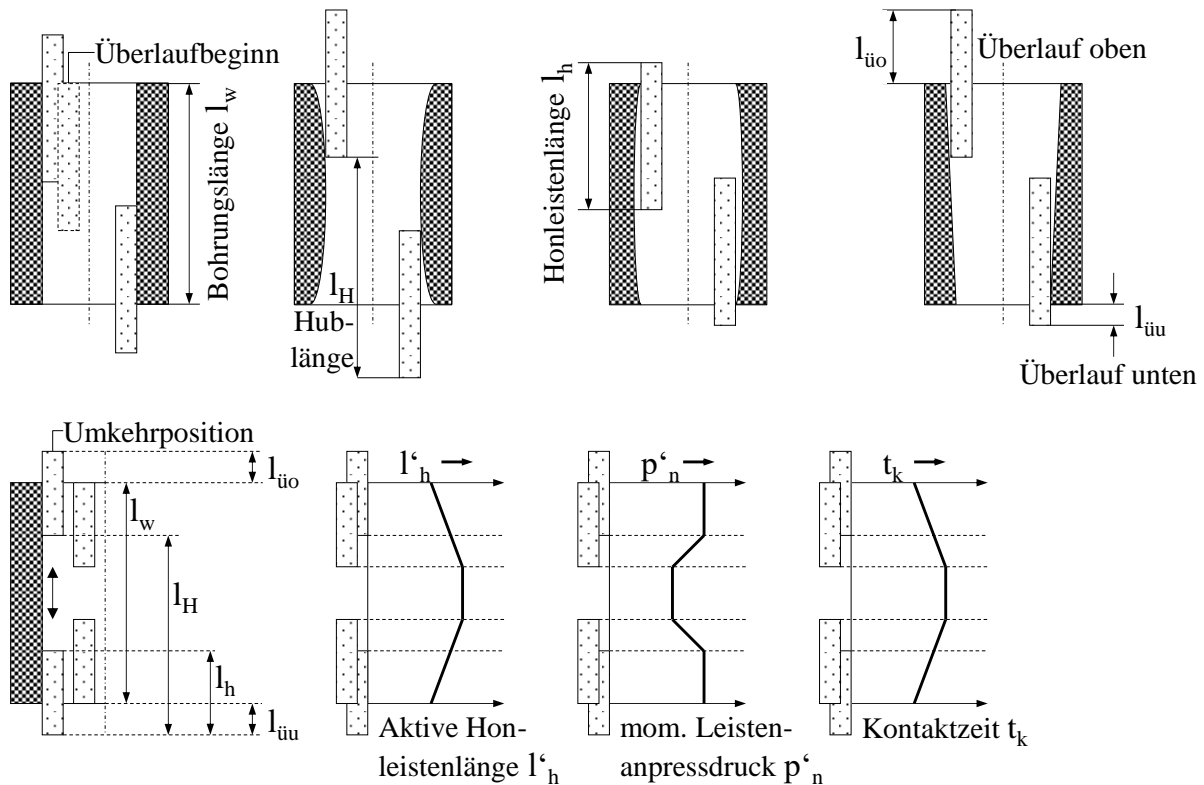


Abbildung 10: Einfluss der Hublänge l_H auf die Bohrungsform nach Flores [65]

Aufgrund eines zu kurzen Honfreigangs ist es teilweise nicht möglich eine Honbearbeitung nach oben genannten Parametern durchzuführen. Zur Vermeidung einer Verjüngung im unteren Bohrungsbereich können dann Kurzhübe (Verlängerung der lokalen Kontaktzeit) oder eine Erhöhung des Zustelldrucks (Vergrößerung des lokalen Zeitspannvolumens) in diesen Bereichen erfolgen [66, 115].

Auswirkungen der Eingangsgrößen auf die Werkstückoberfläche

Nach Mushardt [155] und Tönshoff [252] wird die Rauheit der erzeugten Werkstückoberfläche maßgeblich durch die Flächenpressung der Honleiste beeinflusst. Höhere Anpressdrücke führen aufgrund des dadurch bedingten tieferen Eindringens der Einzelschneidkörner in das Werkstück zu einer Erhöhung der Endrauheit.

Juchem [106] führt weiterhin aus, dass durch den Einsatz kleinerer Schneidkorngrößen bzw. durch eine Erhöhung der Schneidkornkonzentration die Endrauheit gesenkt werden kann. Ersteres ist durch die geometrisch bedingte, reduzierte Eindringtiefe kleiner Schneidkörner zu begründen. Durch die Erhöhung der Schneidkornkonzentration verteilt sich die auf die Honleiste einwirkende Zustellkraft auf mehr aus der Honleistenbindung herausstehende Einzelkörner, was nach [155, 252] eine verminderte Korneindringtiefe bewirkt. Aufgrund unter-

schiedlicher Materialeigenschaften (z. B. Härte) ist die erzielte Endrauheit nach [106] ebenfalls vom Werkstückmaterial abhängig.

Einen weiteren Einflussfaktor auf die Oberflächentopographie stellt nach [65] das Einlaufverhalten neuer Honleisten dar. Dabei sinkt die Rauheit an der Werkstückoberfläche solange nichtlinear ab, bis sich ein für die verwendete Honleistenspezifikation typisches Rauheitsniveau eingestellt hat. Weiterhin zeigt [65] auf, dass durch eine Erhöhung der Binderhärte die Schneidkörner länger festgehalten werden können, was zum Abstumpfen der Einzelschneiden und schlussendlich zu einer glatteren Oberfläche führt.

Untersuchungen durch von See [243] und Böhmer [14] zeigen keinen eindeutig belegbaren Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die gefertigte Oberflächenrauheit. Klocke [115] schränkt die Gültigkeit dahingehend ein, dass die im vorausgelagerten Fertigungsschritt erzeugte Rauheit vollständig zerspannt sein muss, damit keine Abhängigkeit mehr von der Ausgangstopographie besteht. Weiterführende Versuche von Böhmer [14] zeigen einen Einfluss der Spindeldrehrichtung auf den R_z -Wert. Erfolgt eine Bearbeitung zwischen zwei Honstufen im Wechsellauf (z. B. rechts-links), so zeigen die Ergebnisse eine Erhöhung des R_z -Wertes gegenüber einer Bearbeitung im Gleichlauf (z. B. links-links). Diese Ergebnisse sind jedoch kritisch zu bewerten, da bei den Versuchen eine thermische Spritzschicht eingesetzt wurde. Die Beurteilung solch poröser und inhomogener Schichten durch den R_z -Wert ist nur bedingt geeignet, da dieser besonders sensibel auf einzelne Porentiefen reagiert ohne die Porenanzahl und Verteilung zu berücksichtigen. (Definition des R_z -Wertes nach [40]: Summe aus der Höhe der größten Profilspitze und der Tiefe des größten Profiltals des Rauheitsprofils innerhalb einer Messstrecke)

Der eingesetzte Kühlschmierstoff beeinflusst nach Dröder et al. [46] ebenfalls die Endrauheit des Werkstücks. Dabei zeigen die Honergebnisse unter Verwendung einer Emulsion eine erhöhte Rauheit gegenüber Honöl sowie einem polymerbasierten Kühlschmierstoff. Dies kann durch die verminderte Schmierwirkung der Emulsion und den damit verbundenen höheren Belastungen auf die einzelnen Schneidkörner begründet werden.

2.3.2 Stand der Technik zum Honen thermischer Spritzschichten

Obwohl thermische Spritzschichten immer öfter Einzug in die Großserienfertigung der Automobilindustrie halten, existieren nur wenige Kenntnisse über die optimale Wahl der Prozessparameter beim Honen solcher Funktionsschichten [237].

Nach [229] besteht die Hauptaufgabe beim Honen thermischer Spritzschichten neben der Einhaltung der Maß- und Formgenauigkeiten darin, die in der Schicht enthaltenen Poren freizulegen. So können Öltaschen erzeugt und die Schmierwirkung verbessert werden. Dabei führen die in der Schicht enthaltenen Metalloxide sowie die vorhandene Porosität zu kurzen Honspänen [3]. Ein Zuschmieren der Poren (Deckelgratbildung) sollte beim Honen verhindert werden, da diese sich im Motorbetrieb lösen können (abrasiver Verschleiß) und dadurch zur Funktionsverschlechterung im Dauerlaufverhalten führen können [3]. In [98] wird das Wasserstrahlen im Anschluss an den Honprozess als Maßnahme zum Beseitigen von unerwünschten Deckelgraten vorgeschlagen. Versuchsergebnisse bzw. daraus abgeleitete Funktionsvorteile sind bis dato jedoch nicht bekannt; als Vorteil dieses nachgelagerten Bearbeitungsschritts kann der Ausschluss eines Motorschadens durch abrasiven Verschleiß prognostiziert werden. Auch die Wirtschaftlichkeit eines im Anschluss an die Honung stattfindenden Wasserstrahlprozesses ist in Frage zu stellen.

Eine weitere Charakteristik thermischer Spritzschichten ist, dass die beim Beschichtungsprozess erzeugte Schichtdicke über der Zylinderbohrung nicht konstant ist. Die hierdurch erzeugte Exzentrizität und mögliche Formfehler können in einem ersten Honschritt mit starrer Spindel, dem sogenannten Positionshonen, ausgeglichen werden. In diesem Prozessschritt wird zur Gewährleistung der geforderten Sollform und -lage ein hohes Materialvolumen zerspannt [144, 231, 268]. Dies führt aufgrund der abrasiven Wirkung der Schichten auf die Honleisten zu einem relativ hohen Bindungs- und somit Honleistenverschleiß [98, 237], was sich nachteilig auf die Werkzeugstandzeiten auswirkt.

In den Untersuchungen von [99] wurde nachgewiesen, dass die Prozessführung beim Honen sich maßgeblich auf die Oberflächeneigenschaften der thermischen Spritzschicht auswirkt. Dabei wird den Einstellparametern in Zustellrichtung ein größerer Einfluss als den kinematischen Parametern (z. B. Drehzahl) zugesprochen. Aus diesem Grund schlägt Schnell [237] die Bearbeitung mit niedrigen Flächenpressungen (ca. 1 MPa, gemessen an der Honleiste) vor, da sonst ein überproportionaler Anstieg des Honleistenverschleißes (metallisch gebundene Diamanthonleisten) erfolgt und es zum Abscheren von kompletten Schichtlamellen kommen kann [3, 71, 73]. In [90] wird diese Delamination als Rissausbreitung entlang der Grenzen einzelner Spritzpartikel beschrieben. Zusätzlich zeigen die Untersuchungen, dass durch eine Prozessführung mit hohen Anpressdrücken eine Verschlechterung der Rauheit einhergeht und es zu Zersetzungen an der Honleiste kommt. Aus einer Erhöhung des Anpressdrucks folgt

zudem ein höheres bezogenes Zeitspanvolumen Q'_w aber auch ein höherer Honleistenverschleiß.

Hinsichtlich der Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit mittels Drehzahlsteigerung zeigen die Ergebnisse von Schnell [237] Unterschiede bei den eingesetzten PTWA- und LDS-Schichten. Während die Drehzahlsteigerung beim Honen von LDS-Schichten keinen Einfluss auf das bezogene Zeitspanvolumen Q'_w zeigt, führt dies bei der PTWA-Schicht zu einer deutlichen Erhöhung. Die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit bewirkt bei den beiden Schichtvarianten eine leichte Reduktion des Honleistenverschleißes. Die zugrunde liegenden Effekte werden allerdings nicht diskutiert. Flores [73] schlägt zur Bearbeitung von thermischen Spritzschichten einen mehrstufigen Prozess unter Verwendung von splitterfähigen Diamantkörnern in hoher Konzentration bei gleichzeitig hoher Bindungshärte vor. Darüber hinaus nennt er als Zielgrößen für die fertiggehone Oberfläche einen R_{pk} -Wert von kleiner $0,1\text{ }\mu\text{m}$ sowie ein durch freigelegte Poren erzeugtes Ölrückhaltevolumen von kleiner $0,015\text{ mm}^3/\text{cm}^2$. Die von Flores aufgezeigten Werte sind als Richtwerte zu verstehen, da eine Optimierung der Honstruktur für jedes tribologische System einzeln erfolgen muss.

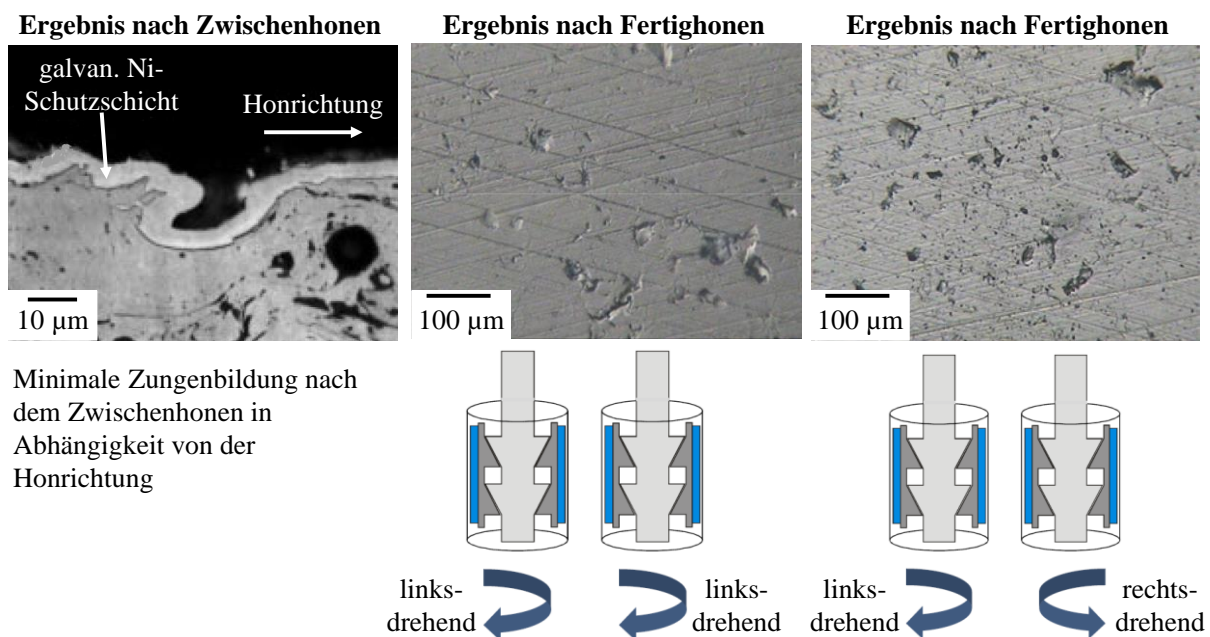


Abbildung 11: Zungenbildung nach Zwischenhonen [3] (links) und Oberfläche nach Fertighonen [14] in Abhängigkeit der Drehrichtung (Mitte, rechts)

Nach [3] verursachen für thermische Spritzschichten ungeeignete Schneidmittel Schichtabplatzer, weswegen Körner mit hohem Selbstschärfungsvermögen vorgeschlagen werden. Die Untersuchungen zeigen, dass nach dem Fertighonen feinste Zungen und Schüppchen an der Oberfläche erkennbar sind, welche in Drehrichtung des Honwerkzeugs orientiert sind (Abbildung 11, links). Diese können durch Drehrichtungswechsel beseitigt werden, sodass

eine Lauffläche mit offenen Poren und glatten, unverschuppten Plateaus entsteht (Abbildung 11, rechts). In diesem letzten Schritt kommen spezielle, elastische Entschuppungsleisten zur Anwendung, deren Aufbau nicht veröffentlicht ist. Untersuchungen von Böhmer [14] auf lichtbogendrahtgespritzten thermischen Spritzschichten (LDS-Schichten) zeigen bei der Honbearbeitung im Wechsellauf jedoch eine erhöhte Gefahr der Schichtschädigung (Ausbruch einzelner Schichtlamellen) auf. Dies kann mittels der durch den Richtungswechsel hervorgerufenen wechselnden Belastungen durch die Schneidkörner erklärt werden.

2.3.3 Gängige Zustellsysteme und Werkzeugkonzepte

Die Technologie des Honens basiert auf der gleichachsigen Ausrichtung von Werkstück und Werkzeug, welche vier Freiheitsgrade erfordert. Translatorische Freiheitsgrade dienen der Positionierung in der Ebene (Zentrieren), rotatorische Freiheitsgrade ermöglichen ein Einschwenken der Achse entsprechend der Schräglage (Kippen). Konventionelle Werkzeugsysteme mit vier Freiheitsgraden beruhen überwiegend auf einer doppelgelenkigen Werkzeugaufnahme, welche dem Werkzeug ermöglicht, jeder Position und Schräglage der Zylinderbohrung zu folgen [65, 66]. Durch kraft- oder wegabhängige Vorschubeinrichtungen wird die Generierung des Honleistenanpressdrucks ermöglicht. Die axiale Zustellung wird dabei über die Expansionskonen des Werkzeugs übertragen und senkrecht zur Werkstückoberfläche umgelenkt [155]. Die kraftgeführte Honleistenzustellung arbeitet dabei nach dem Prinzip der hydraulischen Druckbeaufschlagung eines Kolbens, deren Zustellgeschwindigkeit sich nach der radialen Materialzerspanung richtet. Weggeführte Zustellsysteme erfolgen auf hydromechanischer bzw. elektromechanischer Basis, wobei die schrittweise Zustellung als Steuergröße zum Aufbau der Honleistennormalkraft dient [262]. Während hydraulische Zustellsysteme seit Jahrzehnten weitestgehend universell bzw. für die Finishbearbeitung sowie das Ausfeuern (Bearbeitung mit konstantem Anpressdruck) eingesetzt werden, dienen weggeführte Zustellsysteme der Bearbeitung von Bohrungen mit großen Vorbearbeitungsformfehlern [15, 65, 87, 115, 220, 221, 252, 273]. Aufgrund von Reibkräften in Hubrichtung kommt es zu Übertragungsfehlern zwischen Zustell- und Radialkraft, deren Quotient von Schmid und Bergen [233] als Werkzeugübertragungsfaktor K definiert wurde. Eine Begrenzung der Zustellkraft durch eine Drehmomentüberwachung wird in [179] beschrieben.

Neben dem zuvor beschriebenen gängigen Zustellmechanismus existiert mit dem Positionshonverfahren eine Hontechnologie, welche bewusst auf diese Werkzeugbewegungsfreiheiten verzichtet. Dieses neuartige Honverfahren findet hauptsächlich als erster Prozessschritt beim Honen thermischer Spritzschichten seine Anwendung, da durch die starre Anbindung des

Werkzeugs an der Honspindel Form- und Lagefehler nach dem Beschichtungsprozess eliminiert werden können [68, 144, 211].

2.3.4 Beurteilung und tribologischer Einfluss gehonter Zylinderlaufflächen

Zur Charakterisierung fertiggehonter Oberflächen werden im Allgemeinen der Honwinkel α sowie die Laufbahntopographie herangezogen. Dabei wird dem Honwinkel die Funktion der Schmierölverteilung in Axial- und Umfangsrichtung auf der Zylinderlaufbahn zugeschrieben, wodurch sich nach Flores, Abeln und Klink [67] ein kommunizierendes Kanalsystem („kommunizierende Röhren“) ergibt. Flores [65] nennt hier als gebräuchliche Werte 45° bis 75° für den Honwinkel, Wiens [262] weitet dieses Intervall für die meisten gängigen Anwendungen auf 30° bis 90° aus. Da der tribologische Einfluss des Honwinkels auch immer vom jeweiligen Tribosystem abhängt, wird dessen Einfluss in der Literatur teilweise unterschiedlich diskutiert [93, 218, 230, 269]. Übereinstimmend wird einer zu flachen Auslegung ($< 30^\circ$) die Gefahr des Fressens durch eine reduzierte Schmierölverteilung in Axialrichtung [67] beigemessen. Anwendungen, wie das Spiralgleit- oder Spiralstrukturhonen beschreiben Honverfahren, bei denen Honwinkel bis zu 150° dargestellt werden, um eine Reibungs-, Verschleiß- und Ölverbrauchsreduktion zu erzielen [88, 234].

Bei der Gestaltung der Oberflächentopographie moderner Verbrennungsmotoren wird versucht, das tribologische System hinsichtlich der teils widersprüchlichen Zielgrößen Reibung, Verschleiß und Ölverbrauch zu optimieren. Gepaart mit den unterschiedlichen Hersteller- bzw. Kundenanforderungen sowie den vorgegebenen Laufbahntechnologien existieren derzeit auf diesem Gebiet viele Forschungs- und Entwicklungsvorhaben [13, 69, 93, 95, 109, 215, 216, 218, 224–226, 231, 269], bei welchen die Ergebnisse teilweise widersprüchlich sind und nicht immer in dieselbe Richtung weisen. Zumeist werden für die Fertigung von Verbrennungsmotoren glatte Topographien in den Zylinderlaufbahnen bevorzugt [225].

Die messtechnische Erfassung technischer Oberflächen erfolgt beispielsweise nach dem Tastschnittverfahren gemäß DIN EN ISO 3274 [27]. Aus den so aufgenommenen Profilschnitten lassen sich nach DIN EN ISO 4287 [40] die Oberflächenkennwerte in Senkrechtparameter (Amplitudenkennwerte), Waagrechtparameter (Abstandskenngrößen) und Hybridparameter einteilen. Hier sei insbesondere auf die Rautiefe R_z sowie den Mittenrauwert R_a verwiesen. Die Normen DIN EN ISO 13565 Teil 1-3 definieren „Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften“ [28], zu denen auch gehonte Oberflächen zu zählen sind. Diese Normsammlung beschreibt die Filterung des Rauheitsprofils sowie eine hierauf basierende Ableitung der Materialanteilskurve (Abbott-Kurve). Die Abbott-Kurve beschreibt den Materi-

alanteil im Rauheitsprofil in drei Höhenschichten, wobei Spitzen-, Kern- und Talbereich getrennt voneinander ausgewertet werden (siehe Abbildung 12).

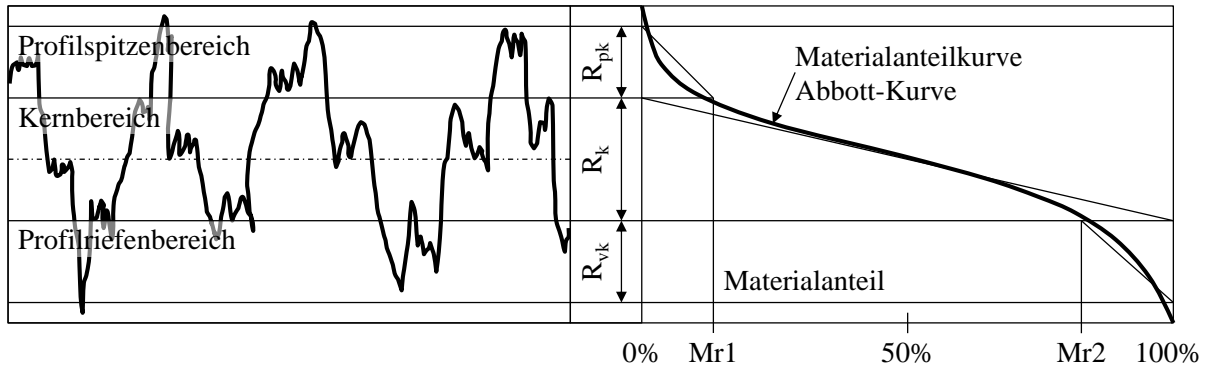


Abbildung 12: Rauheitsprofil und Kenngrößen der Materialanteilkurve nach DIN EN ISO 13565

Wichtige Parameter der Abbott-Kurve sind [29]:

- **Reduzierte Spitzenhöhe R_{pk}** : Höhe, der aus dem Kernbereich herausragenden Spitzen
- **Kernrautiefe R_k** : Tiefe des Rauheitskernprofils
- **Reduzierte Riefentiefe R_{vk}** : Tiefe der Profiltäler unterhalb des Rauheitskernprofils
- **Materialanteil M_{r1} und M_{r2}** : Materialanteil, in Prozent, des kleinsten und größten Materialanteils des Rauheitskernprofils

Hannemann [93] liefert aus den Kenngrößen der Abbott-Kurve abgeleitete Parameter, welche zur Beschreibung thermischer Spritzschichten entwickelt wurden. Hierbei wird versucht, eine Beschreibung der Honriefen R_{hon} , des Ölrückhaltevolumens R_{vv} sowie der Lamelligkeit R_{lam} gehonter thermischer Spritzschichten mittels 2D-Kennwerten durchzuführen. Untersuchungen und Messungen an thermisch gespritzten Kurbelgehäusen zeigen, dass die Aussagefähigkeit des R_{lam} als recht gering eingestuft werden kann. Die Kennwerte sind dabei wie folgt definiert:

$$R_{hon} = \frac{R_k}{(R_{pk} + 0,25R_{vk})} \quad [-] \quad (14)$$

$$R_{lam} = (R_{pk} + 0,25R_{vk}) \quad [\mu m] \quad (15)$$

$$R_{vv} = (100 - M_{r2}) \frac{R_{vk}}{20} \quad \left[\frac{mm^3}{dm^2} \right] \quad (16)$$

Eine weitere Möglichkeit der Beurteilung gehonter Oberflächen liefern 3D-Kenngrößen. Grundlage hierfür bilden flächenhafte, optische Messverfahren (z. B. Weißlichtinterferometrie oder Konfokalmikroskopie). Neben der in der Norm DIN EN ISO 25178 Teil 2-3 [41, 42] beschriebenen Flächenkennwerten sowie der zugrunde liegenden Filterung liefert Hercke [94] eine Möglichkeit zur Honstrukturbewertung auf Basis der Strukturtrennung. Dabei liegt eine optische 3D-Oberflächenmessung zu Grunde, bei welcher die Oberfläche in typische Strukturen, wie Riefen, Poren oder sonstige Strukturmerkmale aufgeteilt werden. Mittels daraus abgeleiteter Funktionskenngrößen können Einflüsse der jeweiligen Strukturmerkmale auf die Motorfunktion objektiv abgeleitet und Rückschlüsse auf eine mögliche Optimierung des Honprozesses geschlossen werden.

2.4 Honprozesse zur Berücksichtigung betriebsbedingter Verformungen

Neben der Reduktion der Zylinderverzüge über strukturmechanische Anpassungen [239] besteht die Möglichkeit eines fertigungstechnischen Vorhalts einzelner Verzugsanteile oder sogar zylinderspezifischer und betriebspunktabhängiger Gesamtverzüge durch das Formhonen. Nach DIN 8589, Teil 14 [33] wird das Formhonen als ein Prozess mit gesteuerter, ortsauflöser Vorschubbewegung definiert und in Langhub-Innen-, Kurzhub-Innen- sowie Kurzhub-Außen-Formhonen unterteilt. Die nachfolgenden Kapitel beschreiben Methoden zur unrunder Honbearbeitung von Zylinderlaufbahnen sowie deren Beurteilung.

2.4.1 Herstellung unrunder Zylinderbohrungen ohne gesteuerte Vorschubbewegung

Beim **Brillenhonen** [190, 193] wird auf die Deckfläche des Kurbelgehäuses eine Spannplatte montiert [72, 191], wodurch bereits während der Honbearbeitung die Belastung der eigentlichen Zylinderkopfverschraubung simuliert wird [65].

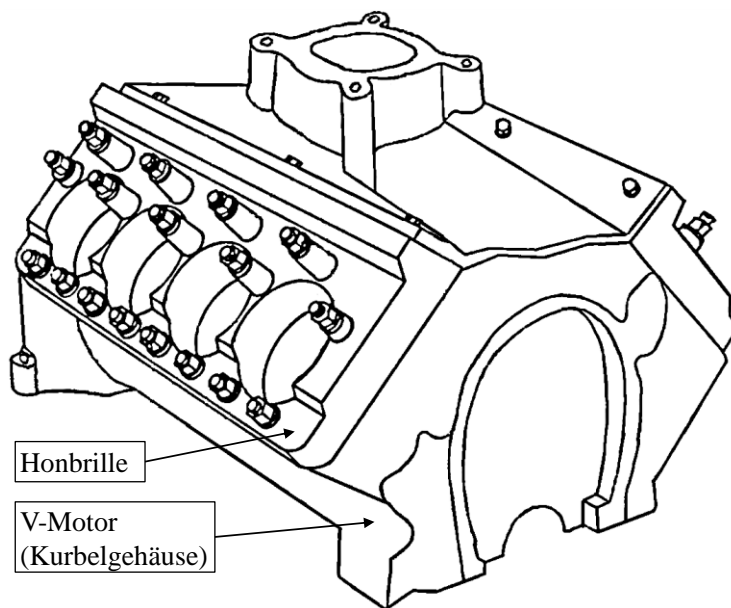


Abbildung 13: Montierte Honbrille [269]

Die konstruktive Auslegung der sogenannten Honbrille (Abbildung 13) muss derart gestaltet werden, dass die dadurch verursachten Montageverzüge hinsichtlich Form, Lage und Amplitude vergleichbar mit denen der finalen Zylinderkopfverschraubung sind. Die anschließende Honbearbeitung erfolgt unter Verwendung „konventioneller“ Honwerkzeuge, wobei die elastischen Werkstückverformungen egalisiert werden, sodass im verspannten Zustand eine zylindrische Bohrungsform entsteht. Zur besseren Abbildung der kaltstatischen Zylinderdeformationen kommen teilweise auch die originalen Zylinderkopfdichtungen oder mit Sicken konturierten Honbrillen zum Einsatz [262]. Die Verschraubung der Honbrille erfolgt dabei einerseits mit den original Zylinderkopfdehnschrauben, welche später an die Montage-

linie zurücktransportiert werden müssen. Andererseits werden auch Honbrillenschrauben verwendet, welche nach [260] häufiger eingesetzt werden können, ohne dass sich eine plastische Verformung im Bereich der Streckgrenze einstellt. Das Brillenhonen findet vor allem im Motorsport sowie in Einzelfällen in der Klein- und Großserienproduktion Anwendung [4, 141, 175]. Dies ist durch den höheren Handlingsaufwand und die teureren Prozesskosten (Honbrillenmontage und –demontage, Teilerückführung oder –reinigung) zu begründen.

Beim **Heißhonen** wird das Kurbelgehäuse neben der mechanischen Verspannung mit einer Honbrille zusätzlich homogen mittels heißem Honöl oder im Vorfeld auf einer Heizplatte erwärmt [185, 186]. Ziel ist dabei, mit konventionellen Honwerkzeugen die Verschraubungsverzüge als auch die thermischen Verzüge vorzuhalten. Dieser Ansatz ist jedoch kritisch zu betrachten, da die homogene, thermisch bedingte Aufweitung der Zylinderbohrungen die realen thermischen Verzüge nicht hinreichend nachbildet [54] und ein Vorhalten dieser nahezu zylindrischen thermischen Ausgleichskontur für das Kolbenringpaket wenig Reibungsvorteile bietet. Zusätzlich zu den hohen Prozesskosten des Brillenhonens müssen beim Einsatz des Heißhonens die lange Aufheizzeit sowie der Investitionsbedarf an Sicherheitseinrichtungen (zum Schutz vor dem heißen Honöl) berücksichtigt werden [262].

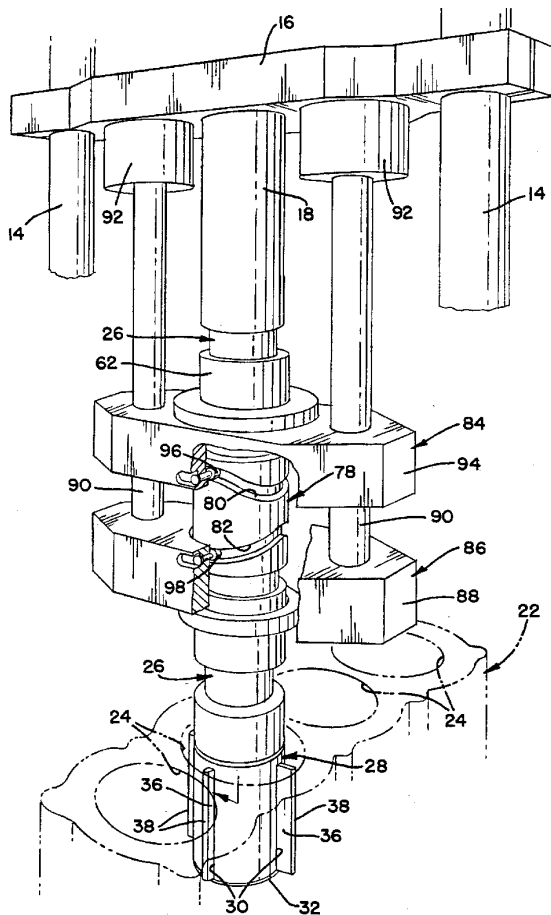
Schmid [230] beschreibt eine Methodik zu Erzeugung makrogeometrischer Zylinderdeformationen mittels **externer Kraftbeaufschlagung** ohne Verwendung einer separaten Verspannvorrichtung (Honbrille). Die Krafteinleitung erfolgt dabei deckflächenseitig über Druckeinheiten oder mittels Querkraften an den Kurbelgehäusewandungen. Pischinger et al. [212] liefern im Rahmen ihrer Untersuchungen Ergebnisse zum makrogeometrischen Einfluss derartiger gehonter Laufflächen auf Reibung, Verschleiß und Ölverbrauch. Wie auch das Heißhonverfahren ist dieses Bearbeitungsverfahren kritisch zu bewerten, da die Frage offen bleibt, inwieweit hier ein phasen- und amplitudengetreuer sowie bauteil- und bohrungsspezifischer Vorhalt kalt- und warmstatischer Zylinderverzüge erfolgen kann. Schmid [230] weist darauf hin, dass mittels dieser Honmethode nur einfache Formen niedriger Ordnung darstellbar sind und deren theoretischer Beitrag zum CO₂-Potential bislang noch evaluiert wird.

Die Patentschrift WO 2014/146919 A1 [192] sowie Schmid [232] beschreiben ein Honverfahren und Werkzeugkonzept zur Herstellung einer Bohrungsform mit axial unterschiedlichen Durchmessern. Das beim sogenannten **Bottleneckhonen** verwendete Ringwerkzeug besteht dabei aus mehreren über den Umfang verteilten Schneidgruppen. Jede Schneidgruppe beinhaltet drei oder mehr kurze Honleisten. Mittels axial unterschiedlicher Anpressdrücke sowie durch Bearbeitung mit unterschiedlichen Hublängen kann so eine kreisrunde Bohrungsform

mit axial unterschiedlichen Durchmessern gehont werden. Die Fertigung konischer Bohrungsformen [187], bei denen der obere Zylinderbereich einen kleineren Durchmesser aufweist als der untere, ermöglicht hinsichtlich Reibungs-, Blow-by- und Ölverbrauchsreduzierung einige Vorteile. Im oberen engeren Bohrungsabschnitt können eine hohe Dichtwirkung, eine gute Kolbenführung und gute Akustik (verringerte Kolbensekundärbewegung) trotz der thermischen Aufweitung des Zylinderrohrs sichergestellt werden. Im unteren Bohrungsabschnitt können aufgrund des sinkenden Zylinderdrucks und des größeren Durchmessers die Ring- und Kolbenhemdreibung reduziert werden. Genaue Einsparpotentiale (Kraftstoff und CO₂) zu diesem Verfahren sind bis dato nicht bekannt bzw. veröffentlicht. Ein gezielter Ausgleich von radialen Unrundheiten ist beim Bottleneckhonen werkzeugbedingt nicht gegeben. Somit lassen sich verglichen mit dem Freiformhonen (Kapitel 2.4.3) oder Brillenhonen (Kapitel 2.4.1) keine Verschraubungsverzüge vorhalten.

2.4.2 Formhonkonzepte ohne piezoelektrische Honleistenzustellung

Die Schriften [182, 209, 254] beschreiben **Formhonkonzepte mit mechanischem Zustellmechanismus**. Die Bearbeitung trochoidaler und ovaler Bohrungsformen (Abbildung 14) beruht dabei auf der mechanischen Übertragung definierter Sollformen von Referenzkörpern („Kopierhonen“). Nachteile dieser Systeme sind einerseits das geringe radiale Formaflösungsvermögen aufgrund eines schlechten dynamischen Übertragungsverhaltens; andererseits ist eine axiale Formänderung im Allgemeinen nicht darstellbar [97]. Grimm und Klink [84] beschreiben weiterhin ein Konzept zur konischen Honbearbeitung unter Einsatz eines konisch ausgebildeten Honwerkzeugs, wobei auch hier das unzureichende Übertragungsverhalten sowie der Verschleiß der Referenzkörper (bedingt durch das Abtasten) als Störgrößen gelten [262]. Die Offenlegungsschrift [184] behandelt ein Honverfahren und –werkzeug zur Fertigung von ovalen Bohrungsformen. Technisch erfolgt dies mittels einer zur Honspindel exzentrischen Werkzeugaufnahme sowie eines definierten Verdrehens des Wirkelements je Spindelumdrehung zur Beschreibung eines Ovals.



- 14 Lot / Führungsstangen
- 16 Querstrebe
- 18 Rotationsspindel
- 22 Werkstück / Kurbelgehäuse
- 24 Zylinderbohrung
- 26 Zylindrische Antriebswelle
- 28 Werkzeuggrundträger
- 30 Führungsnut für Honleistenträger
- 32 Bodenplatte des Honwerkzeugs
- 36 Honleistenträger
- 38 Honleiste
- 62 Lagerhülse
- 78 Nockenhülse
- 80 Obere Nockennut
- 82 Untere Nockennut
- 84 Nockenfolger / Nockenstößel
- 86 Nockenfolger / Nockenstößel
- 88 Rahmen
- 90 Führungsstange
- 92 Lager
- 96 Nockenfolgerrolle

Abbildung 14: Honen trochoidaler und ovaler Bohrungsformen [182, 209, 254]

Darüber hinaus werden in der Fachliteratur Konzepte zum **Nachhonen unrunder Bohrungskonturen** diskutiert. Naerman und Ivockin [172] liefern hierzu ein über den Hydraulikdruck regelbares Werkzeugsystem, bei welchem die Honleistenträger in radialer Richtung schwenkbar sind. Die Auslenkung erfolgt dabei durch Tauchkolben. Die Honbearbeitung mit konstantem Hydraulikdruck soll ein Nachhonen zuvor eingebrachter Makrogeometrien ermöglichen. In [127] wird ebenfalls ein Honkopf zum äquidistanten Nachhonen polygonaler Bohrungen mit ungerader Kantenzahl erläutert. Eine kritische Beurteilung der beiden Konzepte [127, 172] kann aufgrund fehlender Bearbeitungsergebnisse nicht erfolgen. Klink und Flores [114] beschreiben ein Honwerkzeug mit Federsegmenten, welche um den Umfang und axial verteilt sind und der Bohrungsform nachlaufen (Abbildung 15). Dieses Werkzeug dient der Glätthonoperation von zylindrischen Bohrungen, wobei lediglich ca. 3 μm bis 5 μm zerspant werden. Mittels der Segmentierung der Honleistenträger gelangt eine hohe Schneidbelagsfläche parallel in Eingriff, gleichzeitig wird ein hohes axiales Auflösungsvermögen sichergestellt. Als Störgröße gilt bei diesem Konzept die hohe Federsteifigkeit, welche bei einer Zunahme des Einfederweges eine entsprechend hohe Steigerung des Honleistenanpressdrucks bedingt [262]. Weigmann [260] sieht die Anwendung eines federnd gelagerten Honwerkzeugs eben-

falls als Fertighonschritt von zuvor unrund gehonten Zylinderbohrungen an. Die nachlaufende Honbearbeitung verfolgt dabei das Ziel einer konstanten Topographieausbildung ohne wesentliche Beeinflussung der Makrogeometrie (siehe Abbildung 15).

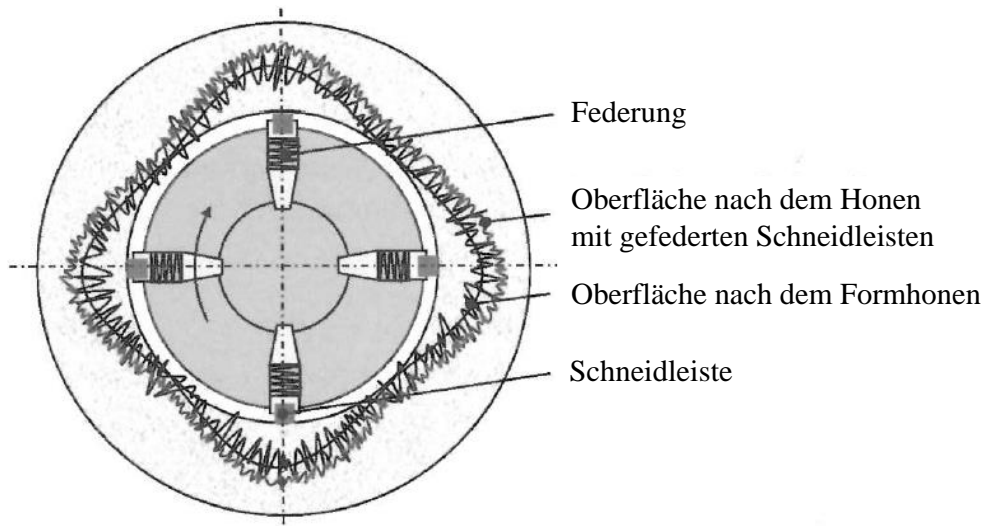


Abbildung 15: Federnd gelagertes Honwerkzeug nach Weigmann [260]

Wiens [265] zeigt in seinen Versuchen, dass durch eine Formhonzbearbeitung die Rauheit an den Formextrema aufgrund der schwankenden Bearbeitungskräfte Unterschiede gegenüber anderen Bohrungsstellen aufweisen kann. Diese Topographieunterschiede beeinflussen das Schneidverhalten in den nachfolgenden Honoperationen und führen zu Wechselwirkungen zwischen Form und Oberflächenrauheit. Wiens [265] zeigt, dass eine äquidistante Materialzerspannung während des Zwischenformhonzens zu lokal unterschiedlichen Rauheiten führt; im Gegenzug dazu führt die Erzeugung einer konstanten Rauheit zu lokal unterschiedlichen Zerspanvolumina.

Weigmann [260] beschreibt ein als Schwenkhon bezeichnetes Formhonzverfahren, welches sich von konventionellen Honverfahren dahingehend unterscheidet, dass das Werkzeug keine rotatorische, sondern eine Schwingbewegung ausführt. Diese oszillierende Bewegung in Umfangs- und Axialrichtung soll in definierten Bohrungsbereichen die lokale Kontaktzeit und somit auch das örtliche Zerspanvolumen steigern. Das Schwenkhon beschreibt somit ein **Formhonzverfahren**, bei welchem die **Schneidmitteleinwirkdauer und -häufigkeit** (Kontaktzeit) als Steuergröße dient. In den Patenten EP1815943A1 [52] und EP1815944A1 [53] wird die Parametrierung des Schwenkhonzprozesses durch Anpassung von Amplitude sowie von Frequenz und Nulllage der Schwenkbewegung vorgenommen. Darüber hinaus beeinflusst die Anzahl und Anordnung der Schneid- und Führungsleisten die Erzeugung möglicher Formelemente.

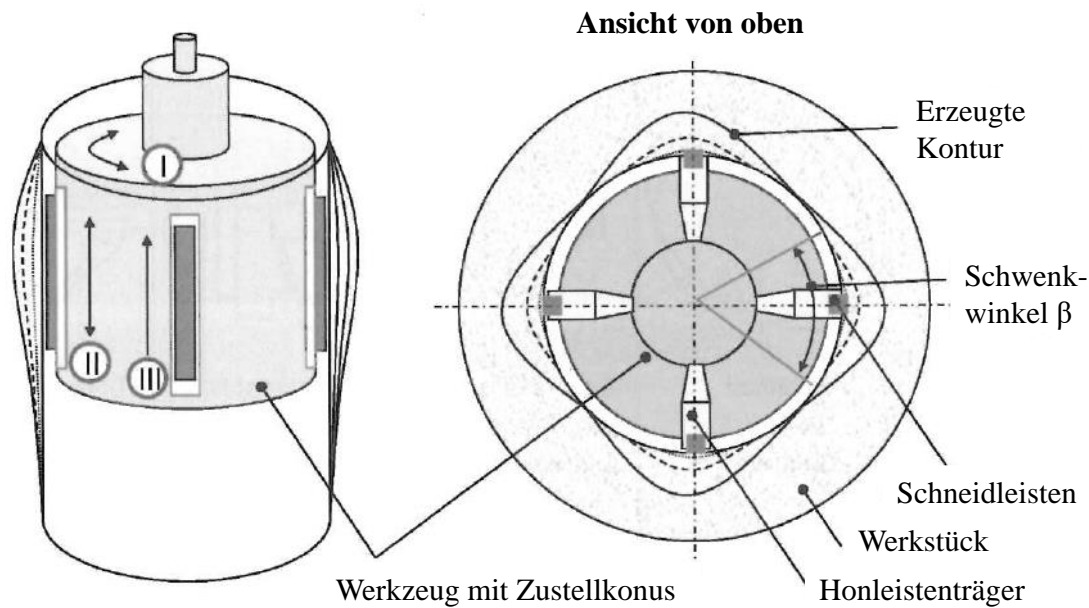


Abbildung 16: Schwenkhonen nach Weigmann [260]

In der Offenlegungsschrift DE102009050612A1 [180] wird ebenfalls ein Formhonverfahren beschrieben, bei welchem die lokale Kontaktzeit als Steuerungsgröße herangezogen wird. Das Werkzeug führt dabei eine rotierende Bewegung aus und ist mit einer geringen Anzahl an sehr kurzen Honleisten bestückt. Durch Anpassung der Honparameter Hubgeschwindigkeit, -lage, Drehzahl und Honleistenlänge kann der Honprozess so ausgelegt werden, dass nur bestimmte Bereiche von den Honleisten überfahren werden, wodurch sich an diesen Stellen Maßänderungen einstellen. Eine Änderung der vorgegebenen Geometrie bedingt eine Anpassung des Prozesses.

Weitere Konzepte der **Formhonbearbeitung** beruhen auf **numerischen Honsteuerungen** zum gezielten Vorhalten betriebsbedingter Zylinderverzüge. Beim Ansatz nach Zurrin [275, 276] wird zum Vorhalt der kaltstatischen Zylinderverzüge ein konventionelles Honwerkzeug mit zentralem Zustellsystem und vier, über den Umfang symmetrisch verteilten Honleisten in Abhängigkeit von Hub- und Winkellage, angesteuert (Abbildung 17). Durch Variation der Hublage sowie des Anpressdrucks kann dabei eine geringe axiale Formänderung erzielt werden. Durch die symmetrische Honleistenanordnung und die zentrale Konuszustellung ist das Formaflösungsvermögen in Umfangsrichtung beschränkt auf Vielfache der 4. Fourierordnung. Für die Darstellung bohrungsspezifischer Freiformen bietet dieses Konzept jedoch zu wenig Freiheitsgrade.

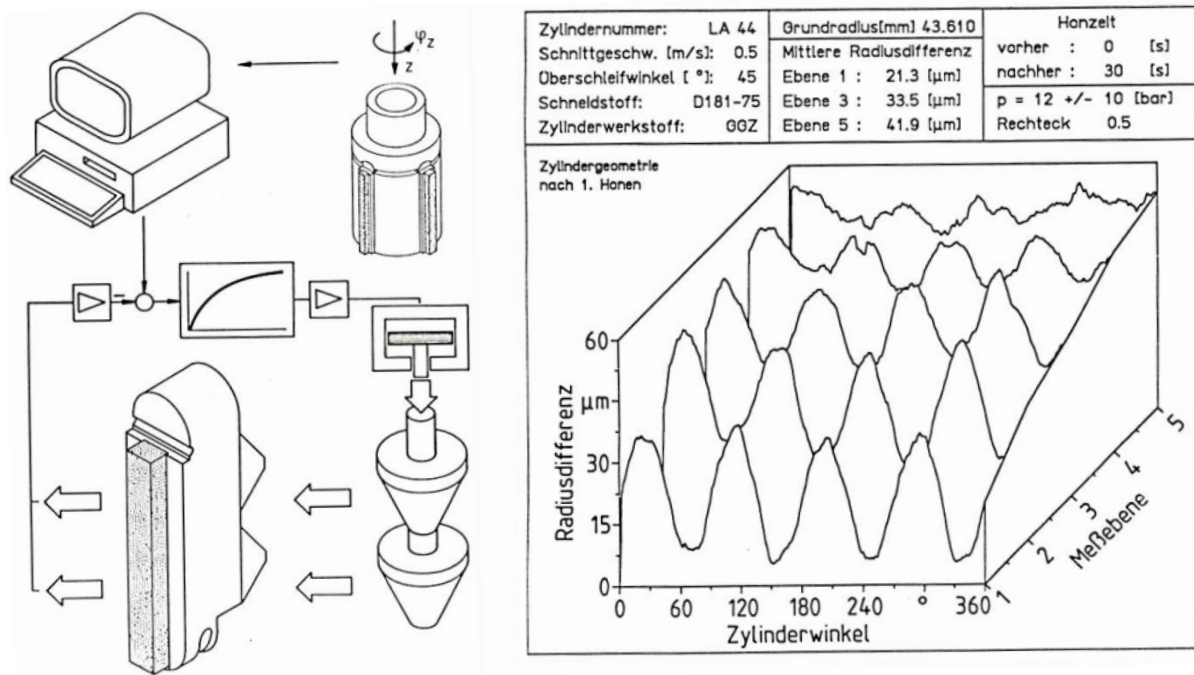


Abbildung 17: Numerisch gesteuertes Formhonzugkonzept nach Zurrin [275, 276]

Eine erste Weiterentwicklung des Konzeptes von Zurrin beschreiben Wiens und Flores [72, 264]. Das Werkzeugkonzept verfügt über zwei unabhängig voneinander zustellbare Honleisten. Die Zustellung der Formhonleisten erfolgt nach [264] rechnergestützt. Die Abstützung der Reaktionskräfte erfolgt durch eine Integration federbelasteter Stützleisten, welche über den Werkzeugumfang verteilt sind. Nach [55, 56] führen die zumeist nicht schneidenden Stützleisten das Werkzeug im Pferchzylinder der Bohrung und nehmen die Reaktionskräfte der aktiven Schneidleisten auf. Als mögliche Werkstoffe werden in [56] Hartmetalle, Kunststoffe, Elastomere oder Schneidmittel mit sehr hoher Konzentration vorgeschlagen. Durch eine Erhöhung der Schneidmittelkonzentration in den Honleisten können die Kräfte am Einzelkorn und somit auch die Schnittkräfte sowie der Stützleistenverschleiß reduziert werden. Aufgrund der unzureichenden Zustelldynamik dieses Werkzeugkonzeptes haben sich in den letzten Jahren Formhonverfahren etabliert, welche auf piezoelektrischer Honleistenzustellung (siehe Kapitel 2.4.3) basieren.

2.4.3 Formhonzugkonzepte mit piezoelektrischer Honleistenzustellung

Derzeitige Formhonzugkonzepte sehen ebenfalls eine Einbringung von Ausgleichskonturen betriebspunktabhängiger Zylinderverzüge über die Steuerung des orts aufgelösten Honleistenanpressdrucks vor. Die aktiven Honleisten werden dabei jedoch einzeln über moderne Piezoaktoren angesteuert.

Das adaptronische Werkzeugkonzept der Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH und des Fraunhofer Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) in Chemnitz (Abbildung 18) basiert auf drei radial und axial versetzten sowie schwimmend gelagerten Schneidgruppen, bestehend aus Stützleiste, Aktorpaket und Schneidleiste [214]. Die Energieübertragung für die Stapelaktoren erfolgt über ein Schleifringssystem an der Gelenkstange [236]. Die diametrale Lage der Multilayeraktoren (Reihen- bzw. Parallelschaltung einzelner Piezoaktoren) im Werkzeuggrundkörper ermöglicht einen Leerhub von ca. 60 bis 80 Mikrometern bei einer Blockierkraft von 4000 N. Die Rückstellung der Leisten wird durch Radialfedern gewährleistet. Der Werkzeugdurchmesser stellt hier allerdings einen limitierenden Faktor dar, da die maximale Auslenkung der Piezoaktoren generell nur im ‰-Bereich der Stapellänge liegt. Der direkte Kraftfluss in Zustellrichtung bedingt wiederum eine hohe Werkzeugdynamik, wodurch bei ersten Formhönversuchen einer Unrundheit vierter Fourierordnung bei einer radialen Ausprägung von ca. 20 µm eine Formgenauigkeit von ± 2 µm erzielt werden konnte [173]. Das Verfahren wird aktuell als Ersatz für eine Brillenhönung verwendet [48], da der Vorhalt thermischer Deformationsanteile aufgrund des eingeschränkten Hubes nur bedingt möglich ist.

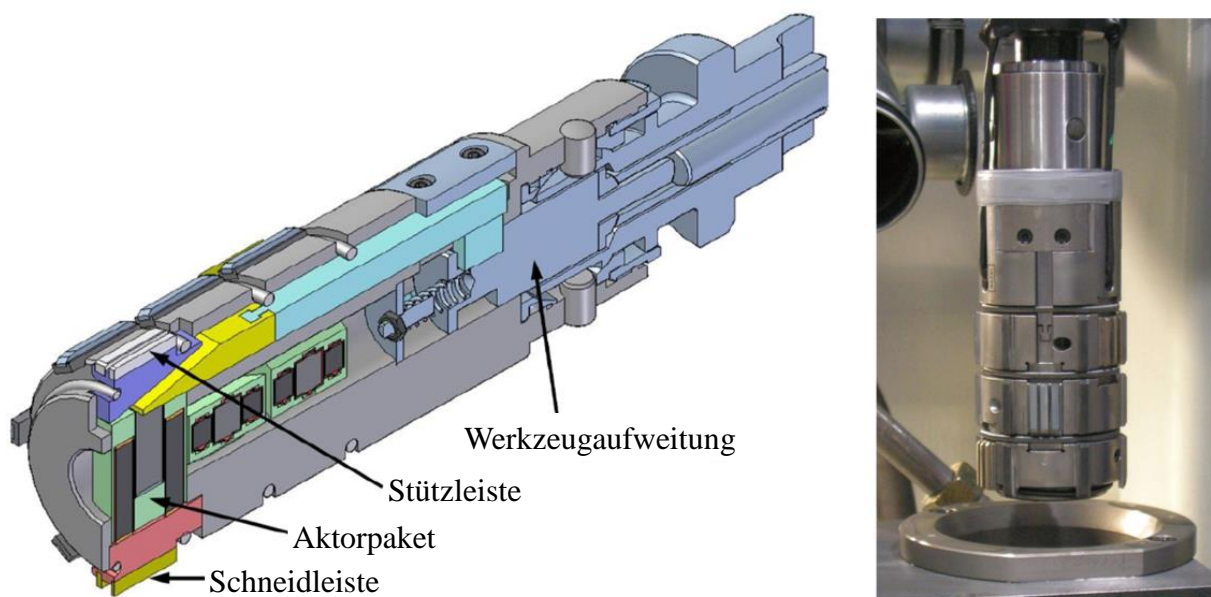


Abbildung 18: Adaptronisches Formhönkonzept der Fa. Nagel und des Fraunhofer IWU [48, 173, 176]

Die Idee eines piezo-hydraulischen Formhönkonzepts wird in der Offenlegungsschrift DE 10 2008 064 592 A1 [210] erläutert (Abbildung 19). Die konstruktive Umsetzung und Prozessentwicklung erfolgt im Rahmen von Forschungsarbeiten am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig und wird in der Dissertation von

Große beschrieben [85]. Das im Werkzeug befindliche Hydrauliksystem übersetzt die Aktorbewegung in eine radiale Honleistenzustellung. Abgedichtet wird das Werkzeugsystem durch Wellbalgkolben. Der Einsatz dieser Wellbalgkolben ermöglicht im Gegensatz zu dem zuvor beschriebenen Konzept eine aktive Honleistenrückführung. Technisch erfolgt dies durch die hydraulische Übersetzung und die mechanische Kopplung von Aktor und Wellbalgkolben an der Antriebsseite sowie des Honleistenträgers mit dem Wellbalg auf der Abtriebsseite. Ein weiterer Vorteil dieses Systems ist seine Flexibilität hinsichtlich des Aktorstellwegs. Dieser kann durch das Verhältnis der effektiven Kolbenfläche von An- und Abtriebsseite verändert werden. Desweiteren wird bei diesem Werkzeugkonzept eine Möglichkeit zum kraftgeregelten Formhonen diskutiert, wobei die Druckmessung innerhalb des Systems der Bestimmung der Honleistanpresskraft in Abhängigkeit der Abtriebskolbenfläche dient [97]. Erste Versuche von Große belegen, dass sich die hohe Dynamik und die aktive Rückstellbewegung der Leisten positiv auf die erzielbare Formgenauigkeit auswirken [85].

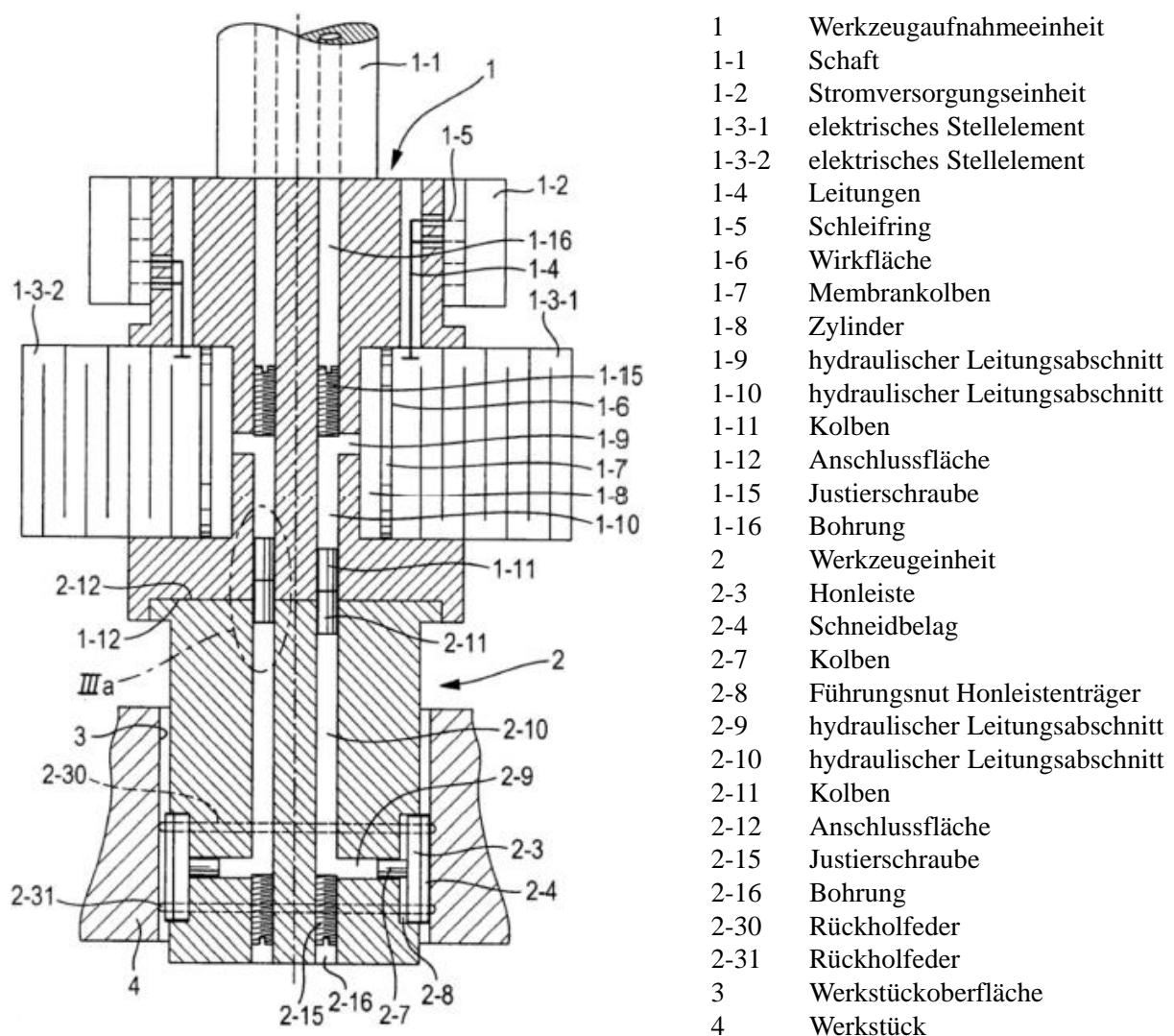


Abbildung 19: Piezo-hydraulisches Formhonkonzept [210]

Ein von der Fa. Gehring Technologies GmbH entwickeltes Formhonverfahren, welches den Einsatz von Piezokeramiken zur lokalen Honleistenzustellung verfolgt, ist in der Offenlegungsschrift DE 10 2007 038 123 A1 [177] beschrieben. Abbildung 20 zeigt das modulare Formhonsystem. Gegenüber dem in dieser Arbeit verwendeten System, unterscheidet sich dieses lediglich in der Anordnung der axialen Rückstellfedern sowie in der Anzahl der aktiven Formhonleisten. Daher kann die Beschreibung dieses Formhonsystems den Kapiteln 4.1, 4.2 und 4.3 entnommen werden.

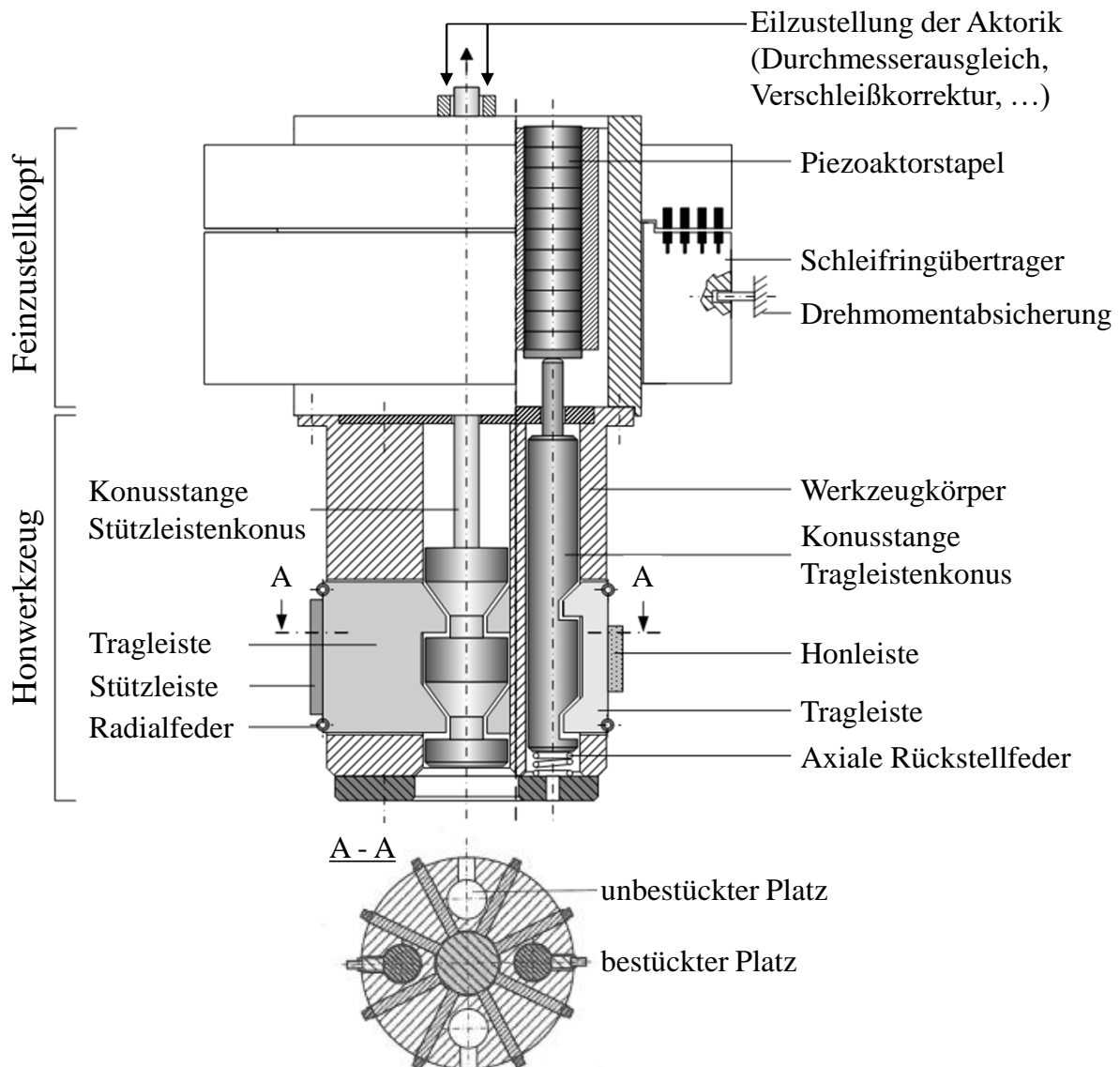


Abbildung 20: Formhonkonzept der Fa. Gehring Technologies GmbH [262, 265, 266]

Bisherige Bearbeitungsversuche mit der Gehring-Formhontechnologie basieren ausschließlich auf der Bearbeitung von Grauguss-Laufbahnen, deren Ergebnisse in den Veröffentlichungen [74, 262–266] diskutiert werden. Die wesentlichen Erkenntnisse nach Wiens [262] sind dabei:

- Mittels eines Kontaktzeitmodells kann eine optimierte Prozesseinrichtung erfolgen, da hierdurch eine gleichmäßige Überdeckung der Bohrungswand durch die aktiven Formhonleisten gewährleistet werden kann. Der Begriff der vollständigen Überdeckung $\ddot{U}D$ beschreibt dabei die benötigte Honzeit $t_{\ddot{U}D}$ zur Erzielung einer gleichmäßigen lokalen Kontaktzeit t_k über der gesamten Bohrungsfläche.
- Grundlegende Untersuchungen zum Zerspanverhalten des Formhonwerkzeugs zeigen nichtlineare Korrelationen in Abhängigkeit vom eingesetzten Schneidmittel, der Ordnungszahl des Stellsignals, dem Absolutwert der Steuerspannung sowie der Hondauer.
- Einflussgrößen auf die Formausbildung stellen die Honleistenlänge (axiale Formaуflösung) sowie deren Überlaufverhalten dar. Der aufgrund der Anordnung der Hartmetallstützleisten entstehende ungleiche Leistenüberlauf im oberen und unteren Bohrungsbereich wirkt sich ebenfalls auf die Bohrungsform aus. Hierbei kommt es zu Einschnürungen im unteren und Aufweitungen im oberen Bohrungsabschnitt. Durch die Bearbeitung im Wechsellauf (Drehrichtungswechsel) wird die Phasenlage der Bohrungsform gegenüber der Sollform verbessert.
- Durch die lokal unterschiedlichen Honleistenanpressdrücke kommt es zu einer örtlich differierenden Topographieausprägung, wobei die Bohrung an den Stellen maximaler Ausprägung rauer ist. Die sich an den Bohrungseingstellen abstützenden Hartmetallleisten sorgen zusätzlich für einen Plateaucharakter.

Der Einsatz von DLC-beschichteten Tragleisten und Konusstangen bewirkt eine deutliche Verbesserung des dynamischen Übertragungsverhaltens des Formhonwerkzeugs aufgrund einer Minimierung der mechanischen Reibkräfte im System.

2.4.4 Beurteilung von formgehonten Zylinderbohrungen

Die Beurteilung formgehonter Oberflächen erfolgt äquivalent zu der konventionell gehonter Zylinderlaufbahnen (siehe Kapitel 2.3.4). Zur Beurteilung der Bohrungsform unrund gehonter Bauteile liefern Hoffmeister et al. [97] eine Weiterentwicklung des bezogenen Zeitspanvolumens Q'_w . Das bezogene Zeitspanvolumen Q'_w [$\text{mm}^3/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$] gibt an, welches Materialvolumen V [mm^3] in einer bestimmten Zeit t_h [s] und mit einer definierten Honleistenfläche A_{HL} [mm^2] bei zylindrischen Bohrungen zerspannt wird.

$$Q'_w = \frac{V}{t_h \cdot A_{HL}} \quad \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s} \cdot \text{mm}^2} \right] \quad (17)$$

Für die Formhonnbearbeitung ist dieser Kennwert allerdings unzureichend, da dieser keine Information über die zu honende Sollform enthält. Neben dem Zerspanvolumen ist eine formgehonte Bohrung durch ihre maximale radiale Formausprägung FA [μm] gekennzeichnet (Abbildung 21). Wiens [262] nennt in diesem Zusammenhang den Begriff der „Formänderungsrate dU_{max}/dt “, welche eine Änderung der im Kapitel 2.1.3 beschriebenen „Unrundheit $U_{max,i}$ “ pro Zeiteinheit beschreibt. Die Formausprägung kann bei gegebener Bohrungsform wie folgt berechnet werden.

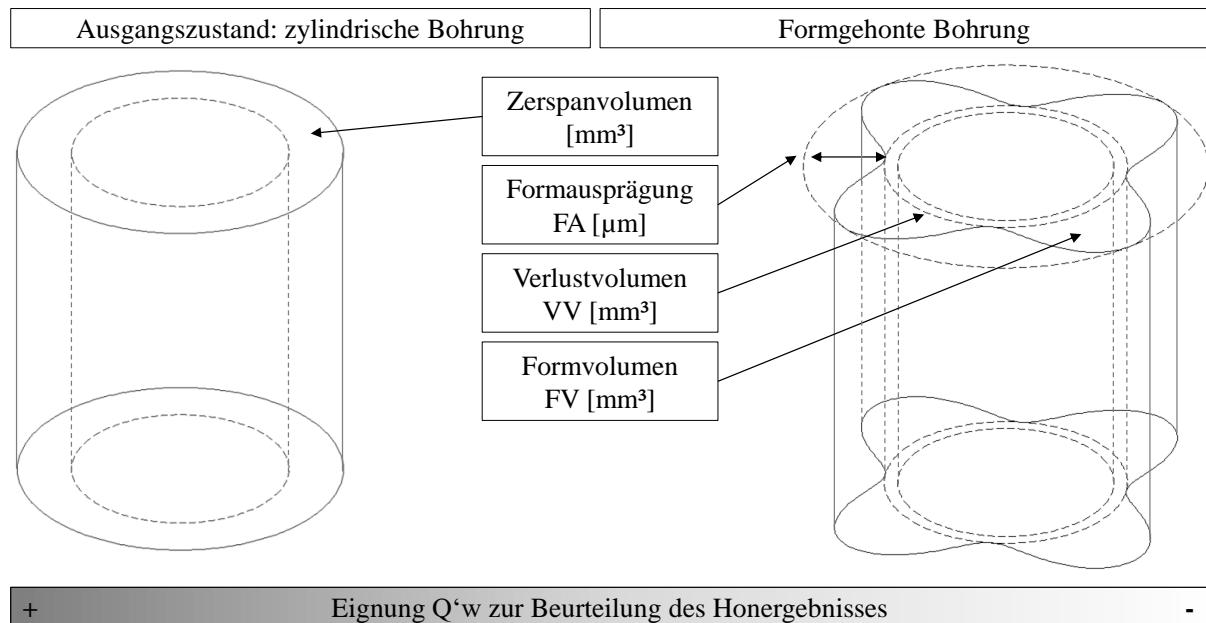


Abbildung 21: Grafische Erläuterung der Begriffe Formausprägung, Formvolumen, Verlustvolumen [97]

$$FA = r_{max} - r_{min} \quad [\mu\text{m}] \quad (18)$$

mit r_{max} : maximaler Bohrungsradius; r_{min} : minimaler Bohrungsradius

Entsprechend Abbildung 21 erfolgt eine Aufteilung des Zerspanvolumens in einen homogenen Materialanteil auf Basis des Ausgangszustandes (Verlustvolumen) sowie einen Volumenanteil zur Darstellung der definierten Sollform (Formvolumen). Das Verlustvolumen VV [mm^3] bzw. das „Verlустаufmaß $\Delta d_v/2$ “ [262] wird durch die minimalen Honleistenanpressdrücke verursacht, wobei das Verlустаufmaß die radiale Zerspanmasse / Zerspanweg an der Bohrungseingestelle darstellt und mittels Zweipunktmessung an der kleinsten lichten Weite (klW) berechnet wird. Die Honleistenanpressdrücke werden zu Prozessbeginn durch einen definierten Anlegewert der Honleisten in der Zylinderbohrung vorgegeben. Zusammen mit dem generierten Formvolumen FV [mm^3] bildet das Verlustvolumen das Zerspanvolumen V_Z . Ein Ziel des Formhonnprozesses ist es, das Verlustvolumen so gering wie möglich zu halten,

sodass an den Engstellen der Bohrung lediglich das Material zerspant wird, welches zum Einstellen der geforderten Oberflächentopographie notwendig ist. Das Verhältnis der Kenngrößen Verlust- und Formvolumen beschreibt den Volumennutzfaktor N (Formel 19). Unter der Annahme der Erreichung der geforderten Oberflächentopographie beschreibt ein hoher Volumennutzfaktor einen effizient gestalteten Formhonprozess.

$$N = \frac{FV}{VV} \quad [-] \quad (19)$$

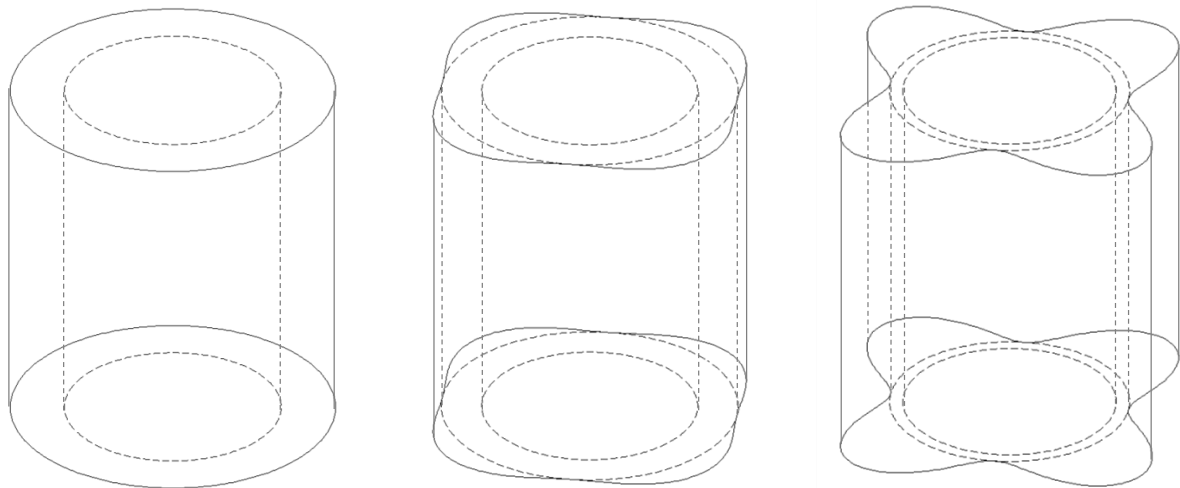
Aus dem Volumennutzfaktor, der radialen Formausprägung, der Honzeit sowie der Honleistenfläche lässt sich der Kennwert Q''_w [$\mu\text{m}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$] ableiten, welcher nach [97] als „Bezogene Formänderungsrate“ definiert wird.

$$Q''_w = N \cdot \frac{FA}{t_h \cdot A_{HL}} \quad \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{s} \cdot \text{mm}^2} \right] \quad (20)$$

$$Q''_w = \frac{FV \cdot FA}{VV \cdot t_h \cdot A_{HL}} \quad \left[\frac{\text{mm}^3 \cdot \mu\text{m}}{\text{mm}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^2} \right] \quad (21)$$

Die bezogene Formänderungsrate kann als Erweiterung des bezogenen Zeitspanvolumens angesehen werden, da sie zusätzlich Informationen zur Makrogeometrie der Zylinderbohrung beinhaltet und bewertet.

Abbildung 22 zeigt unterschiedlich gehonte Zylinderbohrungen, die sich hinsichtlich ihrer Makrogeometrie deutlich unterscheiden. Allerdings weisen alle drei Bohrungen ein konstantes bezogenes Zeitspanvolumen auf, was die unzureichende Wirksamkeit des bezogenen Zeitspanvolumens Q'_w für formgehonte Bohrungen nochmals verdeutlicht. Die bezogene Formänderungsrate hingegen steigt mit wachsendem Formanteil (Formausprägung und Formvolumen) und sinkendem Gleichanteil (Verlustvolumen).



Q'_w [mm ³ /(s*mm ²)]	=	Q'_w [mm ³ /(s*mm ²)]	=	Q'_w [mm ³ /(s*mm ²)]
Q''_w [μm/(s*mm ²)]	<	Q''_w [μm/(s*mm ²)]	<	Q''_w [μm/(s*mm ²)]
N [-]	<	N [-]	<	N [-]
FA [μm]	<	FA [μm]	<	FA [μm]
FV [mm ³]	<	FV [mm ³]	<	FV [mm ³]
VV [mm ³]	>	VV [mm ³]	>	VV [mm ³]

Abbildung 22: Charakterisierung gehonter Bohrungsformen [97]

2.5 Fazit zum Stand der Technik

Der Leichtbau bei Verbrennungsmotoren wird neben Down- und Rightsizing schwerpunktmäßig durch den Einsatz von Leichtmetalllegierungen mit thermischen Spritzschichten vorangetrieben. Die Vorteile des thermischen Spritzens gegenüber Graugusskurbelgehäusen sind das geringere Gewicht aufgrund der niedrigeren Schichtdicken, die hohe Variabilität bezüglich der Beschichtungswerkstoffe sowie das gute Funktions- und Verschleißverhalten. Der Einfluss der Honparameter und Schneidstoffe auf das Zerspanergebnis bei thermischen Spritzschichten ist jedoch nicht umfassend wissenschaftlich untersucht. Weiterhin ist die Wirkung von Riefen, Poren, Ausbrüchen und Deckelgraten auf das tribologische System nicht ausreichend verstanden. Nachteilig sind zudem die teils deutlich geringeren Werkzeugstandzeiten gegenüber Graugusskurbelgehäusen, welche aus der hohen Schichthärte thermischer Spritzschichten resultieren.

Das Unrundhonen stellt eine Möglichkeit zur Reduktion von Kraftstoffverbrauch, Schadstoff- und CO₂-Emissionen dar. Hierzu existieren bereits mehrere fertigungstechnische Ansätze mit unterschiedlichem CO₂-Einsparpotential. Einen Ansatz stellen weggesteuerte, piezoelektrische Formhонverfahren dar, welche Stützleisten zur Abstützung der Reaktionskräfte verwenden. Die Stützleisten sowie die lokal unterschiedlichen Bearbeitungskräfte beeinflussen dabei die Zylinderform und Oberfläche. Zur Herstellung gleichmäßiger Oberflächen im Anschluss an die Formhонbearbeitung kann das Glätthонen mit federnd gelagerten Honleisten angewendet werden. Ein Einfluss des Glätthones auf die Zylinderform konnte nachgewiesen, bislang jedoch nicht quantifiziert werden. Das Glätthонen von thermischen Spritzschichten ist zudem nicht untersucht.

Den erfolgversprechendsten Ansatz des Freiformhонens mit piezoelektrischer Honleistenauslenkung beschreibt Wiens [177]. Dieses neue Verfahren bietet die notwendigen Freiheitsgrade reale Antiverzugskonturen (Negativkontur von Zylinderverzügen) darzustellen. Erste Systemtests und Bearbeitungsergebnisse basieren auf Graugussbuchsen und Graugusskurbelgehäusen. Das Formhонen von thermischen Spritzschichten ist bis dato nicht realisiert. Die messtechnische Beurteilung formgehoher Zylinderbohrungen ist verfügbar und kann hierfür eingesetzt werden. Qualitätsanforderungen an formgehonte Bohrungsgeometrien und Oberflächen sind gegenwärtig nicht beschrieben.

Tabelle 2 stellt dabei die Anforderungen und Bewertungen der einzelnen Technologien abschließend dar.

Tabelle 2: Beurteilung des Stands der Technik – Formhonen und thermisches Spritzen

Technologie	Anforderungen	Bewertung
Thermisches Spritzen	<ul style="list-style-type: none"> - Verschleißschutz - Korrosionsschutz - Thermische Isolierung - gute Wärmeabfuhr - Gute Reibeigenschaften - Werkstoffvielfalt - Hohe Haftfestigkeiten - Wirtschaftlichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> - Erforschtes Gebiet - Spritzverfahren, Schichtbildung, Funktions- und Verschleißverhalten bekannt
Zylindrisches Honen	<ul style="list-style-type: none"> - Maß- und Formgenauigkeit - Erzeugung funktionsgerechter Oberflächen - Wirtschaftlichkeit 	<p>Monolithische Werkstoffe:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erforschtes Gebiet - Grundlegende Zerspanzusammenhänge bekannt <p>Thermische Spritzschichten:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nicht ausreichend wissenschaftlich untersucht - Viele Zerspanzusammenhänge nur unzureichend bekannt
Formhonen	<ul style="list-style-type: none"> - Maß- und Formgenauigkeit - Erzeugung funktionsgerechter Oberflächen - Hohe Stelldynamik - Wirtschaftlichkeit - Thermische Spritzschichten: Vermeidung von Schichtschädigungen 	<p>Monolithische Werkstoffe:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Nicht ausreichend wissenschaftlich untersucht - Viele Zerspanzusammenhänge nur unzureichend bekannt <p>Thermische Spritzschichten:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Formhonen thermischer Spritzschichten nicht realisiert

3 Zielsetzung der Arbeit

Aus dem Stand der Technik lässt sich ein hoher Forschungsbedarf für das Formhonen von thermischen Spritzschichten ableiten (siehe Abbildung 23). Es wird davon ausgegangen, dass das Formhonen in Kombination mit thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen eine Schlüsseltechnologie zur Erzeugung tribologisch verbesserter Makro- und Mikrostrukturen darstellt. Darüber hinaus wird erwartet, dass aufgrund des Honens verursachte Schichtschädigungen durch Begrenzung der Honleistenkräfte sowie eine geeignete Schneidmittelauswahl verhindert werden können. Weiterhin wird vermutet, dass mittels der Kombination aus Form- und Gläthhonen verbesserte Oberflächenstrukturen bei gleichbleibender Formgenauigkeit erzielbar sind.

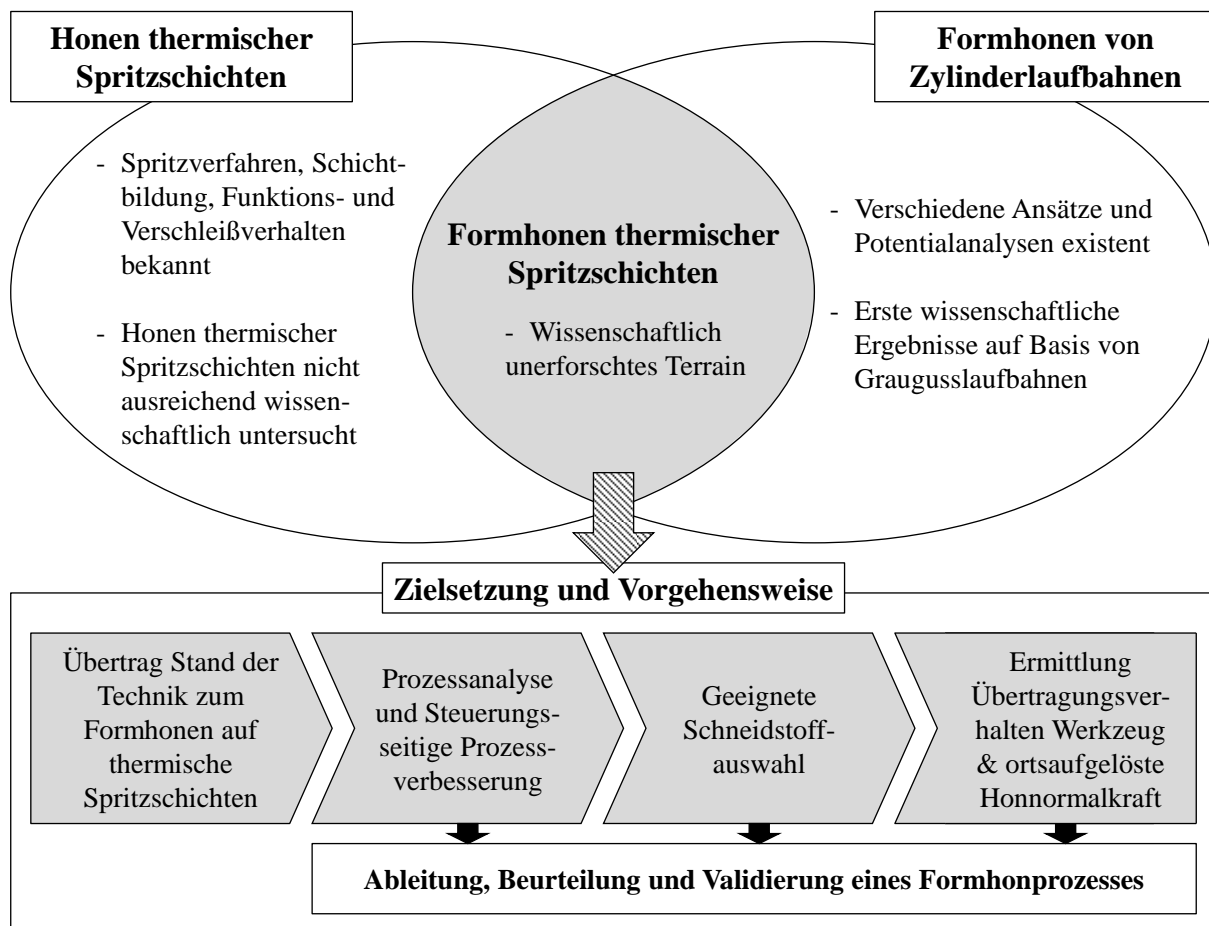


Abbildung 23: Zielsetzung

Diese Arbeit verfolgt das Ziel der Prozessentwicklung des Formhonens auf thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen. Diese Technologie kann unter Anpassung des tribologischen Systems „Zylinderlaufbahn, Kolben, Kolbenringe und Öl“ zur Effizienzverbesserung von Verbrennungsmotoren beitragen. Zur Erreichung des Hauptziels wird folgende Vorgehensweise definiert (siehe Abbildung 23):

- Anwendung des bestehenden, piezoelektrischen Formhon-Versuchskonzepts der Firma Gehring Technologies GmbH (DE 10 2007 038 123 A1) auf lichtbogendrahtgespritzten Zylinderlaufflächen
- Steuerungsseitige Prozessverbesserung durch Anpassung von Drehrichtung sowie Begrenzung des Honleistenanpressdrucks
- Geeignete Schneidmittelauswahl je Honstufe sowie Untersuchungen zum Schneid- und Verschleißverhalten der einzelnen Schneidstoffe
- Ermittlung des Übertragungsverhaltens des Formhonwerkzeugs sowie Entwicklung einer Kraftmessvorrichtung zur Messung und Analyse der ortsaufgelösten Honleisten-normalkräfte
- Ableitung, Beurteilung und Validierung eines Formhonprozesses

Die Anforderungen an das Formhonsystem hinsichtlich der darstellbaren Geometrien resultieren aus der Messung und Simulation realer Zylinderverzüge von Aluminiumkurbelgehäusen im Normzyklus. Aus den Verzügen abgeleitete, inverse Antiverzugskonturen können je nach betrachtetem Lastfall eine radiale Formausprägung von bis zu 100 μm besitzen. Die Qualitätsanforderungen für Formgenauigkeit und Oberflächentopographie orientieren sich am aktuellen Stand der Technik zum Honen thermischer Spritzschichten. Als zulässige Grenzwerte werden eine Zylinderformtoleranz von 7 μm , eine Durchmesser-toleranz von +14 μm und Rauheitswerte gemäß Tabelle 4 sowie Tabelle 5 definiert. Gleichzeitig ist eine Werkzeugstandzeit von mindestens 1.000 Bohrungen sicherzustellen.

4 Versuchsanlagen und –programm

4.1 Honmaschine, Versuchsträger und Vorrichtungen

Die am IWF der TU Braunschweig verfügbare, konventionelle Honmaschine wird für die Formhonversuche umgerüstet und deren Eigenschaften in diesem Kapitel dargestellt. Die selbst hergestellte Vorrichtung zur Aufnahme der Werkstücke sowie die verwendeten BMW Serien-ZKGs werden ebenfalls hier erläutert.

4.1.1 Versuchs-Formhonmaschine

Die in dieser Arbeit vorgestellten Versuche wurden auf einer Vertikal-Langhub-Formhonmaschine der Firma Gehring Technologies GmbH durchgeführt, deren technische Basisdaten in Tabelle 3 festgehalten sind. Die Versuchsdurchführung erfolgte am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig.

Tabelle 3: Technische Daten der Versuchs-Formhonmaschine [47, 99]

Vertikal-Langhub-Formhonmaschine; Basiseinheit konventionelle Honmaschine Typ Z600		
Hubeinheit	Huberzeugung	hydraulisch
	Hublänge	max. 600 mm
	Hubgeschwindigkeit	3 bis 24 m/min
	Hubleistung	7,5 kW
Drehspindel	Spindeldrehzahl	0 bis 400 U/min
	Spindelleistung	7,5 kW
Zustellung	Stützleistenzustellung	EMZ-F
	Honleisten Grobzustellung	EMZ-F
	Honleisten Feinzustellung	Piezelektrisch
Vorrichtungsaufnahme	Ausführung	Langtisch
	Spannfläche	1000 mm x 500 mm
	Verfahrweg längs	1000 mm

Die Hauptmerkmale dieser einspindligen Formhonmaschine sind neben der starren Anbindung des Formhonwerkzeugs an die Bearbeitungsspindel die beiden elektromechanischen Zustelleinheiten zur Positionierung der Stützleisten sowie des gesamten Aktorpaketes. Der Langtisch inkl. Schwenkvorrichtung ermöglicht gleichzeitig eine flexible Werkstückaufnahme über die Indexbohrungen der Motorblöcke.

Zur Realisierung der beim Honen erforderlichen Relativbewegung von Hub und Rotation verfügt die Honmaschine über eine Entkopplung zwischen hydraulischem Hub und Rotationsantrieb. Hub- und Spindeltrieb befinden sich dabei oberhalb des oberen Lagers (siehe Abbildung 24), wobei eine Kette das Antriebsmoment des Motors auf den Zahnkranz der Honspindel überträgt. Die systemseitige Erfassung der Hub- und Winkellage erfolgt über optisch arbeitende, inkrementelle Wegmesssysteme.

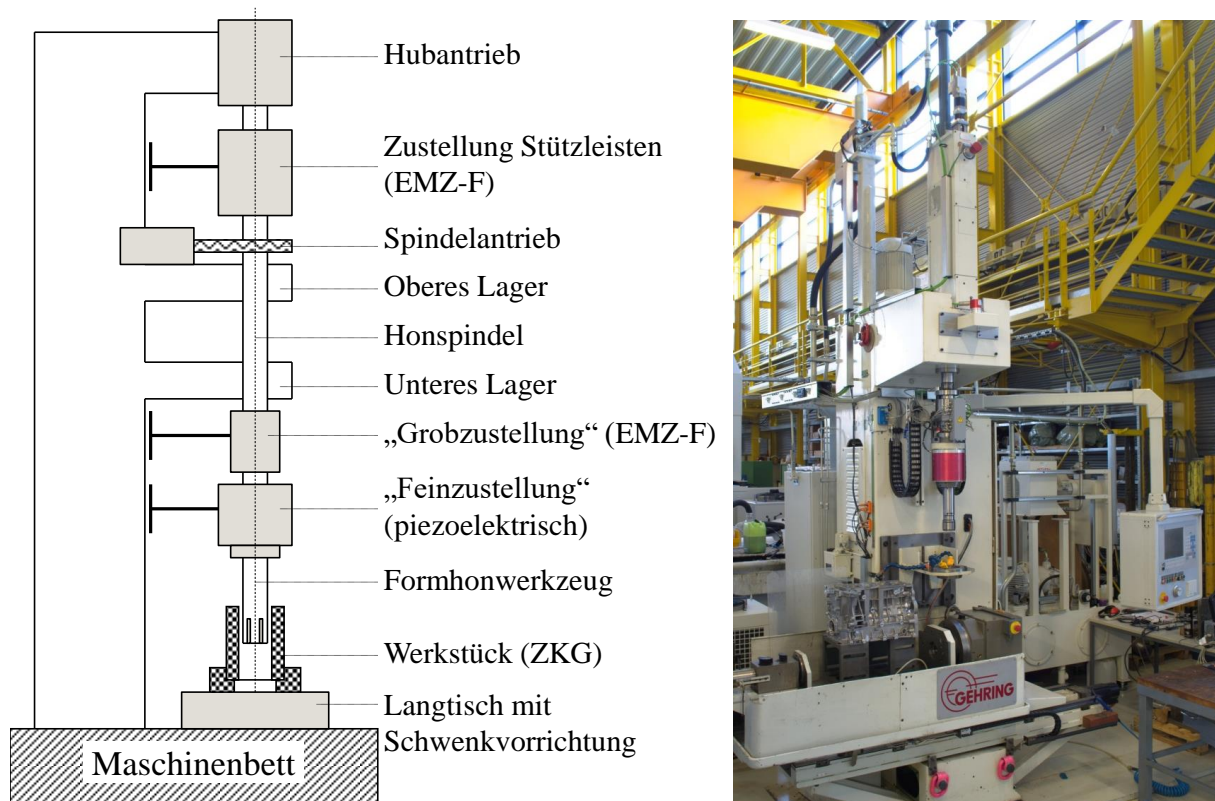


Abbildung 24: Formhonmaschine am IWF der TU Braunschweig [262]

Zusätzlich zur Formhonmaschine wird eine externe Kühlschmierstoff-Anlage (KSS-Anlage) der Firma Transor verwendet. Das Modell TCF II-1-70-A/SK arbeitet mit einer maximalen Filterleistung von 70 l/min bei maximal 500 l Nutzinhalt sowie einer manuellen Schlammaufbereitung. Insgesamt kommen bei dieser Anlage zwei Filtertürme zum Einsatz [167]. Bei allen durchgeführten Versuchen kommt das Honöl „Castrol Honilo 981“ [163] zum Einsatz.

4.1.2 Versuchsträger und Vorrichtungen

Die Untersuchungen werden an Vierzylinder-Reihen-ZKGs der BMW Group durchgeführt. Sie sind durch eine Open-Deck-Bauweise sowie eine lichtbogendrahtgespritzte Zylinderlauffläche gekennzeichnet. Zwei gleichzeitig mittels Pendelschleifen bearbeitete Metallblöcke sowie darauf montierte Indexbolzen fassen den Motorblock auf dem Maschinentisch. Um die ZKGs unter der Honspindel auszurichten sind ölwannenseitig Indexbohrungen eingelassen.

Zwei Niederhalter, die an den äusseren Kurbelwellenlagern angelegt sind, fixieren final den Versuchsträger. Diese Art der Werkstückaufnahme wurde gewählt, da sie keine Auswirkung auf die Zylinderform hat, was bei einer Verspannung über die Verrippungen oder die Deckfläche der Fall wäre. Für Werkstück, Honmaschine und Messgerät ist das Koordinatensystem identisch. Abbildung 25 zeigt eine Darstellung des verwendeten Versuchsträger inklusive Koordinatensystem und wichtiger Charakteristika.

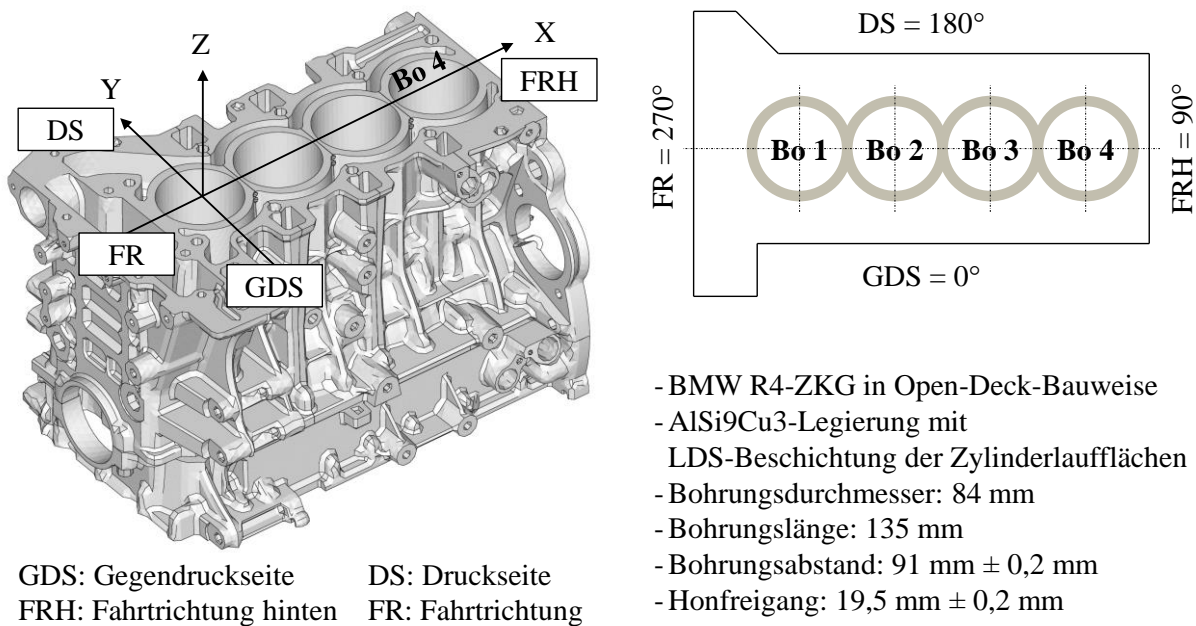


Abbildung 25: BMW R4-ZKG als Versuchsträger der dargestellten Formhonversuche

Der Grundwerkstoff der Versuchsträger ist eine im Druckgussverfahren verarbeitete untereutektische AlSi9Cu3-Legierung mit T5-Wärmebehandlung zur Erhöhung der 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$. Der angelieferte Ausgangszustand der Zylinderlauffläche besteht aus einer positionsgehohten thermischen Spritzschicht, welche in einem vierstufigen Fertigungsprozess hergestellt wird; Feindreihen, Hochdruckemulsionsstrahlen, Lichtbogendrahtspritzen sowie Positionshonen.

Die LDS-Schicht besitzt eine hohe Schichthafftfestigkeit, welche durch die beim Hochdruckemulsionsstrahlverfahren erzeugten Kavitäten und Hinterschneidungen erzielt wird. Die ungehonte, lichtbogendrahtgespritzte Zylinderlauffläche (siehe Kapitel 2.2.2, [227] und [238]) weist eine hohe Rauigkeit ($R_z > 100 \mu\text{m}$) auf. Darüber hinaus zeigen die positionsgehohten Zylinderbohrungen der Versuchsträger folgende Genauigkeiten:

- Durchmesser: 83,900 mm \pm 0,02 mm
- Rundheit $< 0,020$ mm; Geradheit $< 0,015$ mm
- Zylinderbohrung Position $< 0,150$ mm; Rechtwinkligkeit $< 0,030$ mm

Abbildung 26 zeigt einen Mikroschliff sowie eine REM-Aufnahme der unbearbeiteten LDS-Schicht.

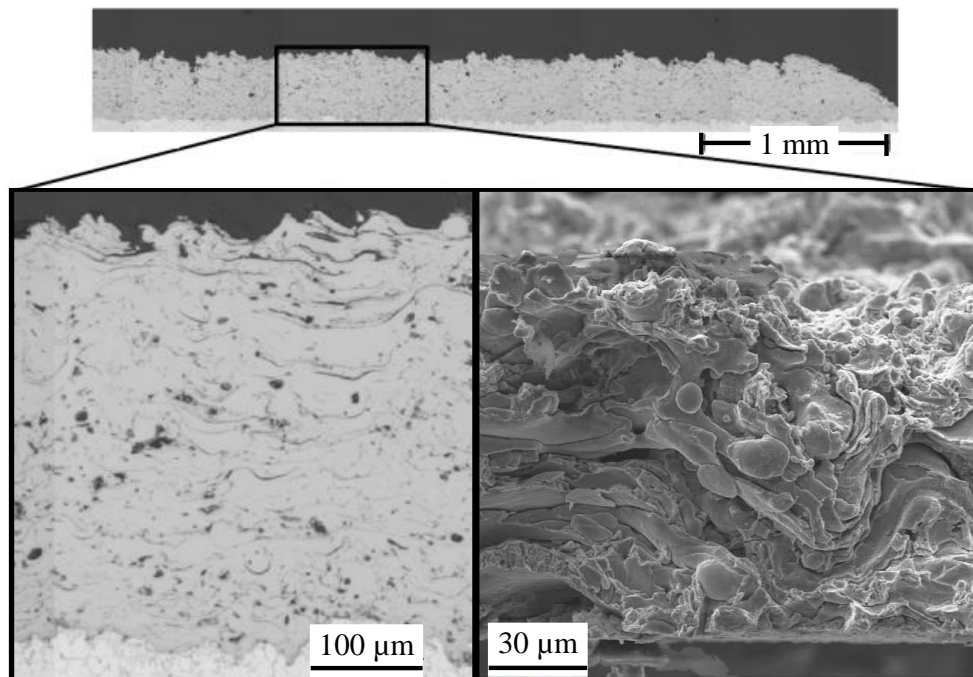


Abbildung 26: Mikroschliff und REM der verwendeten LDS-Schicht [227, 238]

4.2 Werkzeug- und Zustellkonzepte

Die in dieser Arbeit verwendeten Werkzeug- und Zustellkonzepte stellen keine Eigenentwicklungen dar, sondern wurden von der Firma Gehring Technologies GmbH bereitgestellt. Diese Werkzeuge basieren auf dem in [262] und [178, 183] dargestellten Prinzip der Trennung von Honwerkzeug und Feinzustellung (Piezoeinheit), welche auch in Abbildung 20 dargestellt sind.

4.2.1 Formhonen: Werkzeug und Zustellung

Die Formhoneinheit kann in eine Zustell- sowie eine Werkzeugeinheit (Abbildung 27, links) untergliedert werden, welche einerseits räumlich getrennt voneinander angeordnet sind; andererseits existiert eine große Nähe dieser Einheiten zueinander, um ein verbessertes Übertragungsverhalten hinsichtlich der Zustellkräfte zu gewährleisten. Zusätzlich begünstigt diese nahe Anordnung eine hohe mechanische Steifigkeit der Einzelkomponenten. Eine weitere Besonderheit dieses Konzepts ist die Unterbringung dreier Zustellsysteme, wobei die individuelle, orts aufgelöste Schneidleistenzustellung piezoelektrisch erfolgt. Entsprechend Abbildung 20 ist die piezoelektrische Zustelleinheit dem Werkzeug vorangeschaltet, bei welchem jeder einzelnen Honleiste ein Piezostapelaktor zugeordnet werden kann. Als Translatoren werden ferroelektrische, weiche Blei-Zirkonat-Titanat-Aktoren verwendet, deren maximale Längung ca. 190 μm bis 200 μm beträgt, gleichzeitig ermöglicht das System eine Blockierkraft von ca. 5000 N bis 6000 N [160]. Bei einem verwendeten Konuswinkel γ von 40° kann dementsprechend ein unbelasteter „Honleisten-Leerhub“ von ca. 160 μm erzielt werden. Die Aktorkraft und -längung werden dabei über ballige Konusstangen auf die entsprechenden aktiven Honleisten punktförmig übertragen, um eine Moment- und Querkraftübertragung auf die Aktorstapel zu verhindern. Zusätzlich können mittels der Aktorik lediglich Druckkräfte übertragen werden, da keine starre Anbindung an die Konusstangen erfolgt. Gleichzeitig verhindert diese Werkzeuggestaltung eine aktive Honleistenrückholung. Diese erfolgt – ähnlich wie bei konventionellen Honwerkzeugen – über die radialen Umlauffedern sowie mittels der axial angeordneten Rückstellfedern, welche die Konusstangen über einen Sicherungsring gegen die Aktoren drücken. Zur Erreichung eines verbesserten mechanischen Übertragungsverhaltens werden die Konusstangen und Tragleisten des Formhonwerkzeugs mit einer reibungsreduzierenden DLC-Schicht (CrN + a-C:H:W) beschichtet [156]. Insgesamt beinhaltet das verwendete Werkzeug (siehe Abbildung 27) 4 aktive, kurze Formhonleisten, deren Abstand jeweils 90° zueinander beträgt.

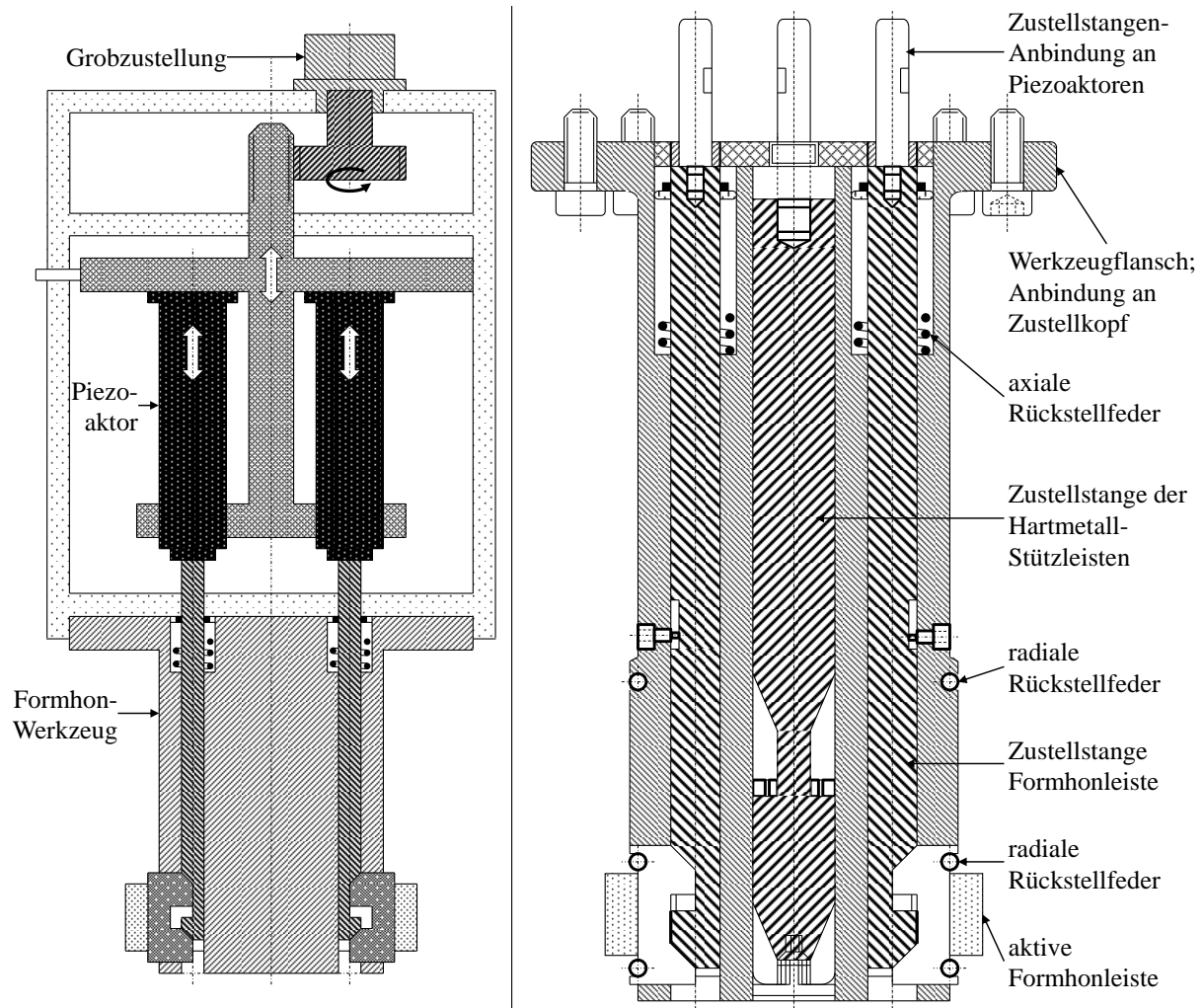


Abbildung 27: Formhoneinheit inkl. Grobzustellung [74] (links); Formhonwerkzeug (rechts)

Zur Ansteuerung (Signal- und Energieübertragung) der Piezoaktoren ist ein 8-bahniges Schleifringsystem inkl. Drehmomentabstützung integriert. Darüber hinaus kann die Änderung des Piezoaktorstellwegs über Dehnmessstreifen erfasst werden, deren Signaldaten ebenfalls über das Schleifringsystem an die Maschinensteuerung übermittelt werden. Die Piezoeinheit stellt somit ein weggeführtes Zustellsystem dar, welches nach Wiens [262] der Kraft-Weg-Proportionalität der verwendeten Stapelaktoren unterliegt. Dabei wird die aufgebrachte Zustellkraft ebenfalls als eine Funktion der Aktorstellwege beschrieben (siehe Kapitel 4.3). Das piezoelektrische Zustellsystem wird ferner als „Feinzustellung“ bezeichnet.

Die maschinenseitig auf 0 V bis 10 V normierten Ansteuersignale der Aktorstapelpakete werden von Analogverstärkern um den Faktor 100 verstärkt (0 V bis 1000 V). Die Verstärkung und somit auch die maximale Honleistenauslenkung unterliegen dabei jedoch der Frequenzabhängigkeit des Systems, für welches nach Wiens [262] eine Grenzfrequenz von ca. 30 Hz bei einer gegebenen Kapazität der Piezoaktoren von ca. 2000 nF ermittelt wurde.

In dieses Konzept wurde zusätzlich eine elektromechanische „Grobzustellung“ (EMZ-F) zur Vorpositionierung der piezoelektrischen Zustelleinheit integriert. Dieser gemeinsame, nicht orts aufgelöste Eilvorschub aller Honleisten inkl. der zugehörigen Piezoaktorstapel dient dem Anlegen der Honleisten an der Bohrungswand und der Nachstellung zum Ausgleich von Honleistenverschleiß sowie diametraler Materialzerspanung. Eine mit der gesamten Piezoeinheit verbundene Zustellstange zur Weiterleitung der axialen „groben“ Zustellbewegung dient simultan der Abstützung der dynamischen, piezoelektrischen Zustellkräfte.

Neben der piezoelektrischen Feinzustellung und elektromechanischen Grobzustellung können über ein zentrales Konussystem acht äquidistant um den Umfang verteilte, 80 mm lange und 6 mm breite Hartmetallstützleisten (Konuswinkel γ von $22,5^\circ$) mittels kraft geregelter elektromechanischer Zustellung (EMZ-F) ausgelenkt werden. Durch die Stützleisten, welche auf dem Pferchzylinder (Zylinder mit dem Durchmesser der Bohrungseingestelle) der Freiform anliegen, sollen die aus den individuellen Honleistenauslenkungen resultierenden Reaktionskräfte abgestützt werden, sodass ein hoher Freiheitsgrad hinsichtlich des Formänderungsvermögens gewährleistet wird. Darüber hinaus ermöglichen die Stützleisten im Zusammenspiel mit der direkten Anbindung des Formhonwerkzeugs an der Honspindel eine optimale Ausrichtung und Stabilisierung der Werkzeugachse in der unrunder Zylinderbohrung.

4.2.2 Glätthonen: Werkzeug und Zustellung

Das eingesetzte Glättwerkzeug der Firma Gehring Technologies GmbH, welches schematisch in Abbildung 28 dargestellt ist, basiert auf den in [178, 183] dargestellten Prinzipien. Ziel dieses Werkzeugs ist die Darstellung eines nachgeschalteten Fertighonprozesses zur Erzeugung einer gleichmäßigen, tribologischen Funktionsoberfläche im Anschluss an eine Formhonung, ohne Veränderung der eingebrachten Makrogeometrie. Die Anbindung des Glätthonwerkzeugs an die Zustelleinheit der Formhonmaschine erfolgt über einen angeflanschten Adapter sowie einen mit der Stützleistenzustellung (EMZ-F) verbundenen Zustellstift als Verlängerung.

Das Glättwerkzeug kann als „passives“ Werkzeug bezeichnet werden, welches ähnlich wie konventionelle Honwerkzeuge über eine Zustellvorrichtung angesteuert wird. Gleichzeitig gewährleistet dieses Konzept die Anbindung an herkömmliche Honmaschinen bzw. deren Steuerung mittels standardisierter Honmaschinensteuerungen. Charakteristisch für das Werkzeug sind die 12 federnd gelagerten, segmentierten Honleisten. Jeweils zwei der 20 mm langen Honleisten werden in einer der sechs gleichmäßig um den Umfang verteilten, u-förmigen Trägerleisten aufgenommen.

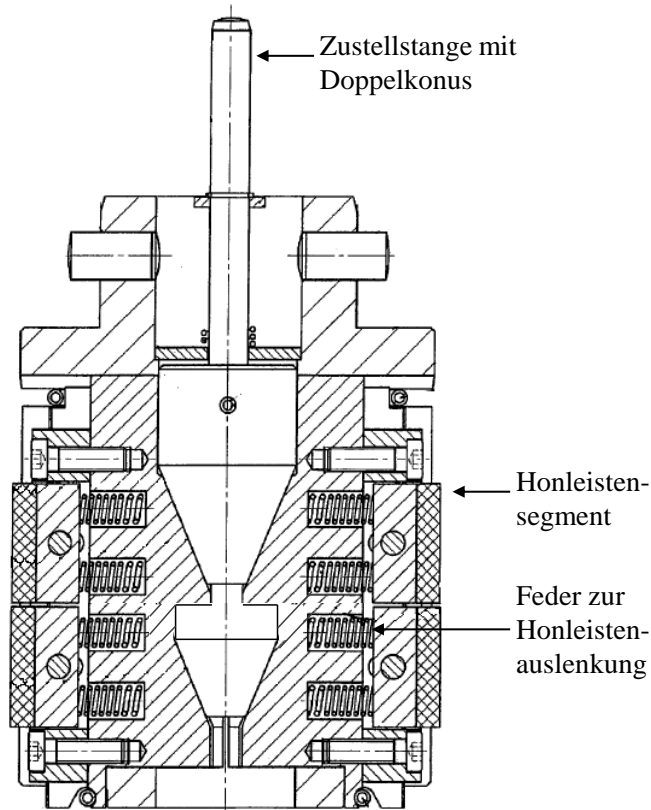


Abbildung 28: Schematische Darstellung des Glätthonwerkzeugs nach Patent DE102010032453A1 [183]

Neben den beiden Federn, welche ein Nachlaufen der zuvor eingebrachten Bohrungsform in Umfangsrichtung bei nahezu gleichbleibendem Honleistenanpressdruck ermöglichen, sorgt ein in Zerstellrichtung verschiebbarer sowie mittig in der Honleiste platzierter Lagerbolzen für einen hohen axialen Freiheitsgrad während des Glätthonprozesses. Konstruktiv kann bei diesem Konzept ein Einfederweg von 3 mm bis 5 mm vorgehalten werden, wobei für einen möglichst gleichbleibenden Anpressdruck die Vorspannung der Federn derart gewählt wird, dass bei einem Ein- und Ausfederweg von 0,1 mm die maximale Änderung der Federkraft kleiner gleich 5% beträgt [183]. Gleichzeitig bestimmt die eingesetzte Federhärte den resultierenden Honleistenanpressdruck. Eine Variation des Honleistenanpressdruckes kann daher nur durch den Tausch der Federelemente erzielt werden. Nach [183] wird weiterhin empfohlen eine Leistenbreite kleiner 0,5-mal der Welligkeit in Umfangsrichtung zu verwenden.

4.3 Steuerungskonzept

Die zuvor messtechnisch oder simulativ ermittelte Sollform muss im Vorfeld der Formhonooperationen in örtlich unterschiedliche Zustellsignale umgewandelt werden. Dabei wird die Sollform durch die hub- und phasenabhängige, radiale Abweichung $\Delta R(\varphi, h)$ von einem idealen Zylinder in einer definierten Anzahl an Höhenmessebenen beschrieben. Wie die Geometrie der Sollform wird die Steuerspannungsmatrix als fest definierte Anzahl horizontaler Zustellebenen sowie gleichmäßig um den Umfang verteilter Winkelsignale dargestellt. Die Formhonung der Sollform erfordert die Transformation der Geometriedaten in den Ansteuerbereich der Piezoaktoren (siehe Abbildung 29).

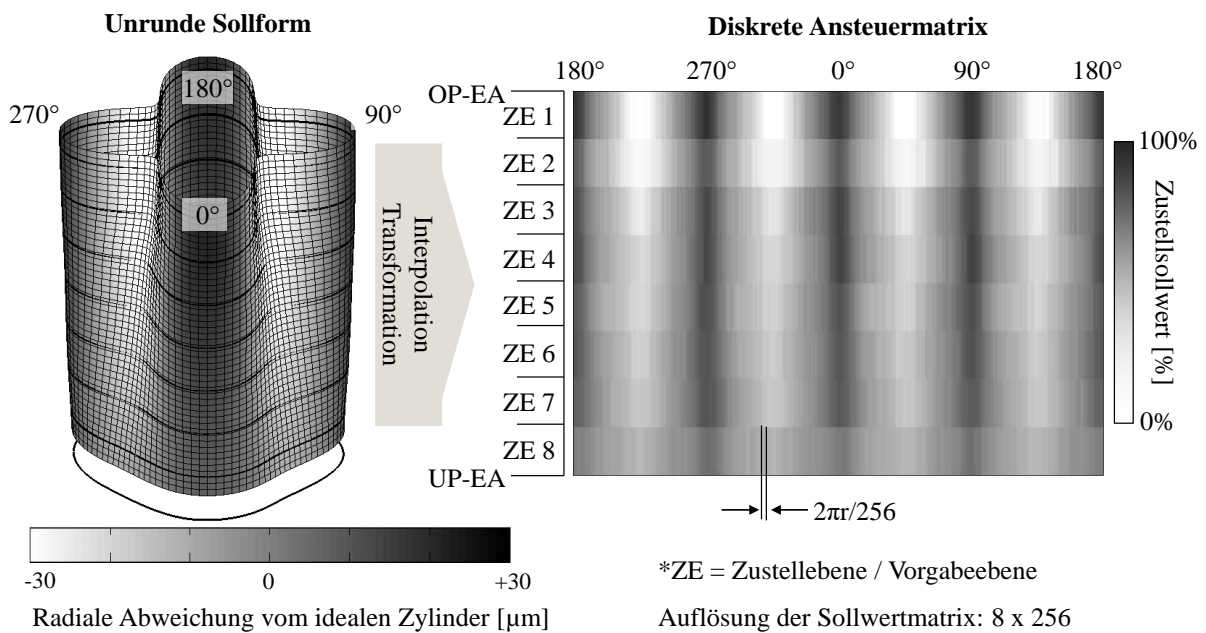


Abbildung 29: Prinzipskizze des verwendeten Formhonsteuerungskonzepts

In einem ersten Schritt muss durch Interpolation bzw. Extrapolation die Auflösung der definierten Sollform an die feste Auflösung der Ansteuerungsmatrix (8 Höhenebenen, 256 Umfangspunkte = 2048 Steuerelemente) angepasst werden. Die als $\Delta R(\varphi, h)$ dargestellte Sollform wird anschließend in eine relative Sollwertmatrix $p_{\text{Soll}}(\varphi, h)$ in [%] umgewandelt, wobei die Steuerspannungen der verwendeten Analogverstärker einen Signalbereich von 0 V bis 10 V verarbeiten können. Dabei entsprechen 0 V einem Zustellwert von 0% und 10 V einem Steuerwert von 100%. Die Auflösungsgenauigkeit der relativen Sollwertmatrix beträgt dabei 1% bzw. 0,1 V.

Legt man das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem sowie die Auflösung der Sollwertmatrix zugrunde, so kann noch eine spektralgetreue Beschreibung einer 128. Fourierordnung erfolgen. Bosse [16] weist jedoch darauf hin, dass für eine Abbildung eines Signals bei einem gleich-

zeitigen maximalen Amplitudenfehler $\leq 5\%$ mindestens 7 Punkte pro Wellenlänge erforderlich sind. Dies führt dazu, dass bei der eingesetzten Auflösung der Sollwertmatrix Fourieranteile bis zur 36. Ordnung in Umfangsrichtung dargestellt werden können. In Axialrichtung kann aufgrund der begrenzten Anzahl von 8 Zustellebenen sowie der eingesetzten Honleistenlänge von 20 mm (Honleistenlänge $l_h \equiv \text{ca. } 1/7$ der Bohrungslänge l_w) nur ein eingeschränktes Formaflösungsvermögen erzielt werden. Dies ist jedoch für die Ausprägung realer Antiverzugskonturen ausreichend.

Neben den 8 frei bedienbaren Zustellebenen sind steuerungsseitig 7 weitere Hilfsebenen implementiert, welche jedoch lediglich der linearen Interpolation der Zustellsignale zwischen zwei Hauptzustellebenen dienen. Hierdurch erfolgt eine Glättung des axialen Zustellsignalverlaufs. Die steuerungsseitige Abtastrate der Zustellsignale ist weiterhin auf 1 ms begrenzt. Bei einer Spindeldrehzahl n von ca. 230 min^{-1} entspricht dies der Durchführung einer Messung je $1,38^\circ$ Bohrungswinkel (ca. 260 Messungen in Umfangsrichtung je Spindeldrehung).

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Störgrößen, welche auf einen Honprozess einwirken, bereits ausführlich beschrieben. Steifigkeitsschwankungen des Werkstücks [276] sowie ein nichtlineares Werkzeugübertragungsverhalten [220, 233] führen zu Schwankungen bezüglich der radialen Schnittkraftkomponente. Die Störgrößen führen dazu, dass die formgehonte Istform iterativ an die Sollform angepasst werden muss. Diese Anpassung erfolgt im Rahmen einer dem Formhonprozess nachgeschalteten Offline-Adaption [262]. Die formgehonte Bohrung $\Delta R_{Ist}(\varphi, h)$ wird hierzu gemessen und mittels Differenzbildung mit der Sollform $\Delta R_{Soll}(\varphi, h)$ verglichen. Die Differenz $\Delta R_{Diff}(\varphi, h)$ stellt somit die orts aufgelöste radiale Abweichung von der Sollform dar. Durch Interpolation erfolgt anschließend eine Anpassung der Auflösung der „Differenzform“ an die der Ansteuerspannungsmatrix $p_{Soll}(\varphi, h)$. Gleichzeitig findet eine Umrechnung der ortsabhängigen, radialen Sollformabweichung $\Delta R_{Diff}(\varphi, h)$ [μm] in eine ebenfalls ortsgebundene relative Steuerspannungsänderung $\Delta p(\varphi, h)$ [%] statt. Der Umrechnungsfaktor ist flexibel je nach Iterationsstufe. Die anschließende Anpassung der Ansteuerspannungsmatrix erfolgt dann nach Formel 22, bei der ein Skalierungsfaktor i als Steuergröße zur Modifikation der neuen Ansteuerspannungsmatrix $p_{Soll_neu}(\varphi, h)$ dient. Eine Begrenzung der Steuerwerte von 0% bis 100% besteht weiterhin.

$$p_{Soll_neu}(\varphi, h) = p_{Soll_alt}(\varphi, h) - (\Delta p(\varphi, h) \cdot i) \quad (22)$$

Die beschriebene Offline-Adaption kann als iterativer Formeinrichtungsprozess angesehen werden, welcher im Rahmen dieser Untersuchungen angewendet wird. Des Weiteren ist die-

ser Iterationsprozess Teil der Formhonsoftware und ermöglicht neben dem Einlesen und Modifizieren der Ansteuermatrix das Einlesen der Soll- und gemessenen Istformen.

Gemäß DIN IEC 60050-351 [39] handelt es sich bei der dargestellten Offline-Adaption nach Wiens [262] um ein Steuerungskonzept und nicht etwa um eine Honprozessregelung, welche eine fortlaufende Erfassung einer Regelgröße erfordert. Da die axiale Auslenkung der Piezoaktoren sowie die orts aufgelösten Steuerspannungen aufgrund der Vernachlässigung des Werkzeugübertragungsverhaltens nicht als Regelgröße in Frage kommen, wird der Gedanke der Implementierung eines Regelsystems im Rahmen dieser Arbeit zurückgestellt.

Die Auslegung des Formhonprozesses erfolgt mit dem Kontaktzeitmodell nach Wiens [262]. Grundgedanke dieses Modells ist das Bestreben nach einer orts aufgelösten gleichmäßigen Kontaktzeit t_k . Das Berechnungsmodell liefert dabei in Abhängigkeit von Honleistenanzahl, -länge und -anordnung sowie Hublage und -länge die passenden kinematischen Bearbeitungsparameter wie Spindeldrehzahl, Hubgeschwindigkeit und -beschleunigung. Weiterhin wird zur phasengetreuen Einbringung der Sollform in jeder Formhonstufe ein Richtungswechsel der Honspindel von Rechts- auf Linkslauf vorgenommen. Der Richtungswechsel ist notwendig, da es während der Rückstellung der Formhonleisten zu reibungsbedingten Verzögerungen im Kraftabfall kommt. Diese resultieren aus der mechanischen Entkopplung der Leisten von der Piezoaktorzustellung [275].

Das Steuerungskonzept der nachgeschalteten Glätthonoperation ist gegenüber der Formhonsteuerung deutlich einfacher gehalten. Die Glätthonung erfolgt dabei zeitgesteuert. Zur Einrichtung dieses Finishprozesses werden die Federsegmente unter Einhaltung eines zuvor definierten Einfederwegs gegen die Bohrungswand vorgespannt. Dies ermöglicht eine Prozessdurchführung unter stets gleichen Bedingungen, da der Honleistenanpressdruck neben der Federkonstante auch durch deren Einfederweg bestimmt wird. Ein definierter Einfederweg zu Prozessbeginn ermöglicht somit eine Reproduzierbarkeit bei der Glätthonbearbeitung.

4.4 Verwendete Messtechnik

Das Kapitel beschreibt die in dieser Arbeit eingesetzten Messmittel zur Erfassung von Bohrungsform, Laufbahntopographie und Honleistenverschleiß.

4.4.1 Formmessung der gehonten Zylinderlaufbahnen

Zur messtechnischen Erfassung der gehonten Bohrungsgeometrien kommt mit dem Incometer ein Zylinderverzugsmesssystem der Fa. Hommel-Etamic zum Einsatz [157]. Standardmäßig ist bei diesem System die Montage in der Zylinderbohrung vorgesehen, welche wahlweise deckflächen- oder lagergassenseitig vorgenommen werden kann. Nachteilig an diesem Spannsystem ist, dass dadurch die Bohrungsform im Bereich der Spannelemente nicht gemessen werden kann. Aus diesem Grund wurde ein Adapterring angefertigt, in welchem das Incometer verspannt wird und welcher schwimmend auf der Kurbelgehäusedeckfläche gelagert ist (Abbildung 30).

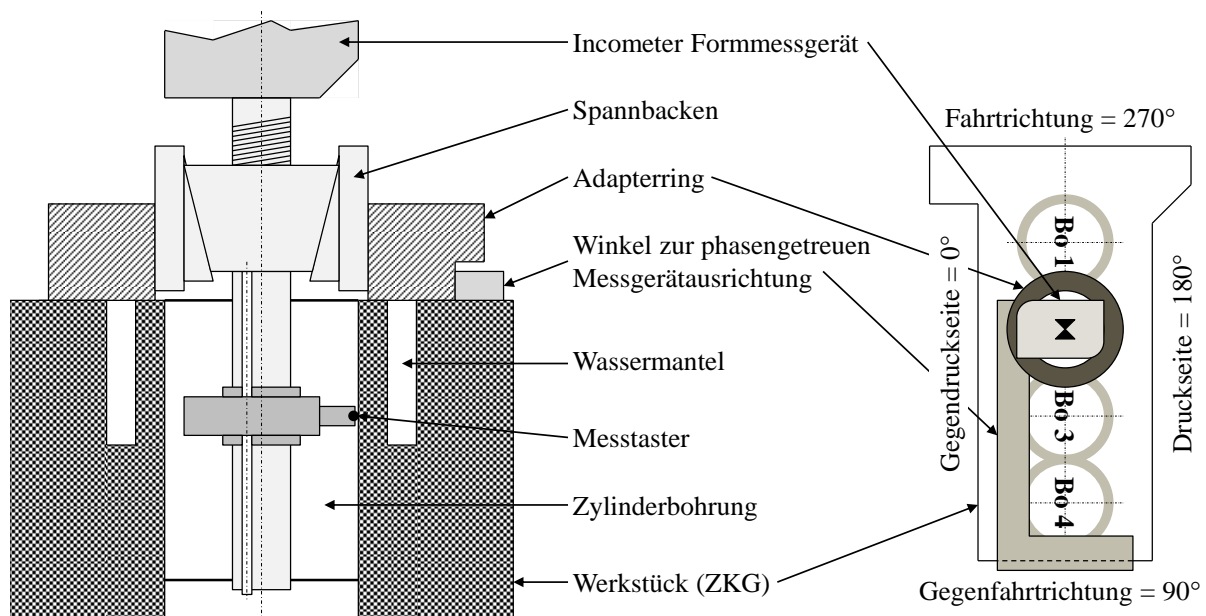


Abbildung 30: Adapter zur Messgerätaufnahme und Anbindung an das Werkstück [112]

Die Ausrichtung des Messgerätes gegenüber der Zylinderbohrung erfolgt anschließend über den Einrichtungsmodus der Messsoftware Incowin [165], wobei der Messtaster auf mittlerer Bohrungshöhe vorpositioniert wird. Die Positioniergenauigkeit des Incometers in Umfangsrichtung beträgt dabei ca. $\pm 1^\circ$. Gleichzeitig wird seitens des Herstellers eine Auflösung von $0,1 \mu\text{m}$ bei einer Wiederholgenauigkeit $\leq 1 \mu\text{m}$ (Rundheit) bzw. $\leq 1,5 \mu\text{m}$ (Zylinderform) genannt. Der nutzbare radiale Messbereich beträgt $\pm 400 \mu\text{m}$. Die Auswertung der Messdaten erfolgt mittels eines Gauß-Tiefpassfilters mit einer Grenzwellenlänge von 50 Wellen in Umfangsrichtung; zur messtechnischen Erfassung und Auswertung der Schiefstellung der Bohrung ist weiterhin der Auswertemodus LSC (Least Square Circle) ausgewählt (siehe Kapitel

2.1.3). Diese gemessenen Exzentrizitäten beziehen sich dabei immer auf die rechnerisch ermittelte Referenzachse. Da das verwendete Messsystem lediglich eine relative Änderung des mittleren Durchmessers (0. Fourierordnung) erfassen und auswerten kann, werden der minimale und maximale Bohrungsdurchmesser für die zweite Messebene (Abbildung 31) mit einem SUBITO SU Innenmessgerät (kurz: Subito) unter Raumtemperatur (20°C) erfasst und mit dem Incometermessschrieb verrechnet, wodurch eine Absolutmessung möglich ist. Die Messgenauigkeit des mit einem Kalibrierring eingestellten Subitos beträgt $\pm 1 \mu\text{m}$.

Zur Bewertung der Formhonergebnisse werden jeweils die Soll- und Istform herangezogen, welche die höhen- und winkelabhängige radiale Abweichung vom Referenzzylinder beschreiben. Die anschließende Differenzbildung $\Delta R_{Diff}(\varphi)$ von Istform $\Delta R_{Ist}(\varphi)$ und Sollform $\Delta R_{Soll}(\varphi)$ liefert für jede Höhenmessebene die entsprechende Differenzkontur. Bei absoluter Übereinstimmung von Ist- und Sollkontur beträgt $\Delta R_{Diff}(\varphi) = 0$. Nach Lönne [131] und Wiens [262] werden für einen amplituden- und phasenetreuen sowie bohrungshöhenabhängigen Formabgleich die Messsignale mittels Fourieranalyse in ihre harmonischen Bestandteile aufgesplittet.

$$\Delta R_{Diff}(\varphi) = \Delta R_{Ist}(\varphi) - \Delta R_{Soll}(\varphi) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Delta R_{Diff}(\varphi) = & (a_{0,Ist} - a_{0,Soll}) \\ & + \sum_{i=1}^n [(a_{i,Ist} - a_{i,Soll}) \cdot \cos(i\varphi) + (b_{i,Ist} - b_{i,Soll}) \cdot \sin(i\varphi)] \end{aligned} \quad (24)$$

Nach Wiens [262] ist mittels der Differenzform eine indirekte Bewertung des Formhonergebnisses möglich, da hierbei auf die Bewertung von Zylinderform- und Rundheitsabweichungen zurückgegriffen werden kann (Geltende Normen: [35–38]). Weiterhin soll in der vorliegenden Arbeit zwischen „absoluter Fertigungs- bzw. Sollformabweichung“ sowie „relativer Fertigungs- bzw. Sollformabweichung“ unterschieden werden. Ersteres bezeichnet nach Wiens [262] die Abweichung von Sollmaß und Sollform, letzteres die Abweichung von der Sollform ohne Berücksichtigung des Absolutmaßes.

Da die gemessenen Fertigungsabweichungen als Grundlage für den iterativen Einrichtungprozess dienen, muss die axiale Lage und Anzahl der Messebenen mit den Zustellebenen der Steuerungsmatrix übereinstimmen. Den 8 Zustellebenen wird daher je eine Hauptmessebene zugeordnet, wobei die Messebenen mittig in den flächigen Zustellebenen positioniert sind (Abbildung 31). Neben diesem Messprogramm wird für eine feinere axiale Auflösung ein Messprogramm mit 29 Messebenen verwendet, welches jedoch die 8 Hauptmessebenen beinhaltet.

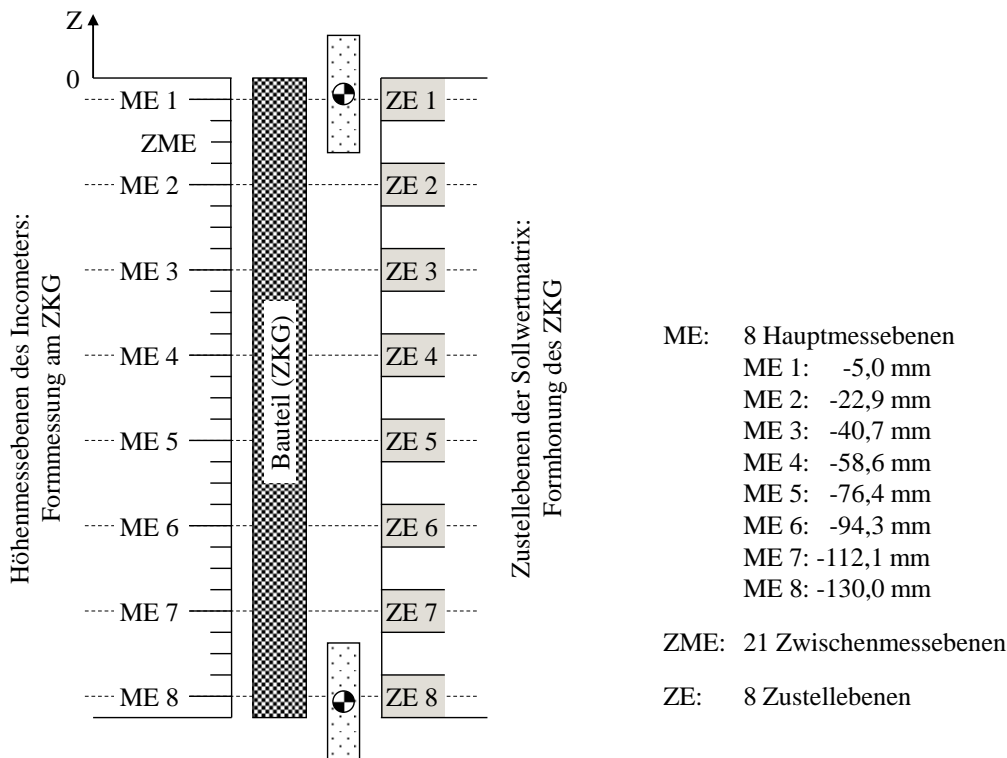


Abbildung 31: Anordnung Formmessebenen und Zustellebenen über der Bohrungshöhe nach Wiens [262]

Für die in dieser Arbeit beschriebenen Formhonaktivitäten wurde eine Durchmessertoleranz von $+14\text{ }\mu\text{m}$ definiert; die Zylinderformtoleranz beträgt dabei $7\text{ }\mu\text{m}$. Wie bereits in Kapitel 2.1.4 beschrieben, sind Fertigungsabweichungen höherer Fourierordnung jedoch kritisch zu bewerten und müssen über eine Fourierzerlegung zusätzlich analysiert werden.

4.4.2 Oberflächencharakterisierung der gehonten Zylinderlaufbahnen

Die Oberflächencharakterisierung der gehonten Zylinderlaufbahnen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mittels subjektiver (Faxbilderstellung) sowie objektiver Verfahren (taktile und konfokale Rauheitsmessungen). Neben der Beurteilung der geometrischen Zylinderform wird diesen Verfahren eine besondere Bedeutung beigemessen, da der Mikrostruktur der Zylinderbohrung ein hoher Einfluss auf das tribologische Funktionsverhalten zugeordnet wird.

Faxbilderstellung und Auswertung

Zur Erstellung von Faxfilmabdrücken werden die gehonten Oberflächen mit Isopropanol (kurz: IPA) ölfrei gereinigt und die ausgewählten Bohrungsstellen anschließend mit Aceton benetzt. Die verwendeten Triacetatfolien müssen blasenfrei auf der benetzten Oberfläche haften, bis das Aceton vollständig verdampft ist. Zur subjektiven Auswertung werden die Abdrücke unter einem Auflichtmikroskop hinsichtlich Poren, Ausbrüchen, Fehlstellen, Deckelgradbildung und Honriefen untersucht. Die maximale Querschnittsfläche teilgeöffneter Poren

kann mit diesem Verfahren nicht bestimmt werden. Eine solche Auswertung ist jedoch nicht erforderlich, da der verfahrensbedingte mittlere Porendurchmesser lediglich ca. $50\text{ }\mu\text{m}$ beträgt. Beim Mikroskopieren wird darauf geachtet innerhalb der messbaren Folienfläche eine repräsentative Stelle zu bestimmen. Der Bildausschnitt der aufgenommenen Faxfilmfläche (Abbildung 32) beträgt dabei $1000\text{ }\mu\text{m} \times 830\text{ }\mu\text{m}$. Da der Formhonprozess mit lokal unterschiedlichen Flächenpressungen arbeitet, welche sich wiederum auf die Laufbahntopographie auswirken können, werden in Abhängigkeit der formgehonten Bohrungsform an unterschiedlichen, aussagekräftigen Bohrungsstellen Faxbilder entnommen. Diese Stellen beschreiben dabei die Positionen maximaler und minimaler Formausprägung. Zusätzlich wird bei der Auswertung die Änderung der Bohrungsform in axialer Richtung berücksichtigt (Stellen des höchsten Zerspanvolumens).

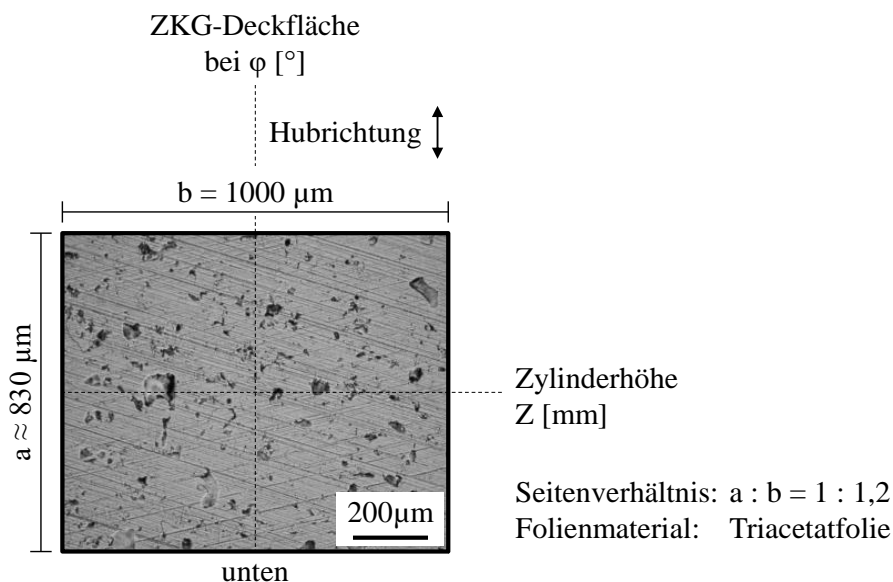


Abbildung 32: Erläuterungen zur standardisierten Darstellung der Faxfilmaufnahmen

Taktile Rauheitsmessungen

Für die taktilen Rauheitsmessungen kommt ein Tastschnittgerät vom Typ „Hommel Tester T1000“ mit einem T1E-Taster (Spitzenlänge = $5\text{ }\mu\text{m}$; Spitzenwinkel = 90°) zum Einsatz. Entsprechend DIN EN ISO 4288 [26] wird die Messstrecke auf $12,5\text{ mm}$ ($10\text{ }\mu\text{m} \leq R_z \leq 50\text{ }\mu\text{m}$) festgelegt. Aufgrund der Inhomogenität der LDS-Oberfläche werden aus je sechs Einzelmessungen ($6 \times 12,5\text{ mm}$ Messstrecke) Mittelwerte für die Oberflächenkenngrößen gebildet, um repräsentative sowie vergleichbare Messergebnisse zu erhalten. Wie bei den zuvor beschriebenen Faxfilmaufnahmen erfolgen aufgrund der unrunder Bohrungsform die taktilen Messungen an diversen markanten Bohrungsstellen. Tabelle 4 zeigt die verwendeten Mess- und Filtereinstellungen inklusive der zu Grunde liegenden Normen sowie die für diese Arbeit definierten Grenzwerte der Oberflächenkenngrößen. Die Gültigkeit der Grenzwerte beschränkt

sich auf die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen. Weiterhin kommen diese Grenzwerte lediglich bei der Beurteilung fertiggehonter (bzw. geglätteter) Zylinderlaufbahnen zum Einsatz. Die Definition eines Grenzwertes für R_z erfolgt für diese Arbeit nicht, da dieser definitionsbedingt sehr stark auf die Porosität der eingesetzten LDS-Schicht reagiert.

Tabelle 4: Taktile Rauheitsmessung – verwendete Einstellparameter und Grenzwerte

Mess- und Filtereinstellungen		
Parameter	Einstellwert	Norm
Taststrecke l_t [mm]	15 mm	Norm DIN EN ISO 4287 [40]
Grenzwellenlänge λ_c [mm]	2,5 mm	Norm DIN EN ISO 4288 [26]
Einzelmessstrecke l_r [mm]	2,5 mm	Norm DIN EN ISO 4287 [40]
(Gesamt-)Messstrecke l_n [mm]	12,5 mm	Norm DIN EN ISO 4287 [40]
Tastgeschwindigkeit v_{tast} [mm/s]	1,00 mm/s	-
Messbereich [μm]	$\pm 100 \mu\text{m}$	-
Profilfilter	nach Norm	Norm DIN EN ISO 11562 [31]
mitgeltende Normen	Norm DIN 4760 [25]	
	Norm DIN EN ISO 3274 [27]	
	Norm DIN EN ISO 4287 [40]	
	Norm DIN EN ISO 4288 [26]	
	Norm DIN EN ISO 11562 [31]	
	Norm DIN EN ISO 12085 [30]	
	Norm DIN EN ISO 13565-1 [28]	
	Norm DIN EN ISO 13565-2 [29]	
Norm DIN EN ISO 16610-31 [43]		
2-D Oberflächenkenngrößen und Grenzwerte für fertiggehone Oberflächen		
Kenngröße	Grenzwert	Norm
R_z [μm]	-	Norm DIN EN ISO 4287 [40]
R_{pk} [μm]	$R_{pk} \leq 0,35$	Norm DIN EN ISO 13565-2 [29]
R_k [μm]	$R_k \leq 0,6$	Norm DIN EN ISO 13565-2 [29]
R_{vk} [μm]	$1,4 \leq R_{vk} \leq 3,6$	Norm DIN EN ISO 13565-2 [29]
M_{r1} [%]	-	Norm DIN EN ISO 13565-2 [29]
M_{r2} [%]	-	Norm DIN EN ISO 13565-2 [29]
R_{hon} [-]	$0,3 \leq R_{hon} \leq 0,8$	-
R_{vv} [mm^3/dm^2]	$0,5 \leq R_{vv} \leq 3,5$	-

Konfokale Rauheitsmessungen

Neben den taktilen, 2-dimensionalen Rauheitsschrieben werden mittels eines Konfokalmikroskops vom Typ „NanoFocus μ surf cylinder“ 3-dimensionale Topographiebilder erzeugt. Die Lichtquelle des Mikroskops bildet eine LED mit 505 nm Wellenlänge. Das verwendete Objektiv zeichnet Einzelfelder der Größe $(550 \times 550) \mu\text{m}^2$ bei einer axialen bzw. lateralen Auflösung von $< 10 \text{ nm}$ bzw. $0,95 \mu\text{m}$ auf. An unterschiedlichen, repräsentativen Bohrungsstellen werden quadratische Messfelder mit einer Fläche von 4 mm^2 aufgenommen. Gemäß DIN 25178-3 [42] wird die gemessene Primäroberfläche durch ein Polynom 2. Grades nach der kleinsten Quadratsumme ausgerichtet, den sogenannten F-Operator. Ein Gauß-Filter (L-Filter) mit einer Grenzwellenlänge von $0,8 \text{ mm}$ filtert anschließend die vorhandenen Gestaltsabweichungen 1. und 2. Ordnung. Darüber hinaus werden ungültige Messpunkte interpoliert und innerhalb des symmetrischen Auswertebereichs $(2 \times 2) \text{ mm}^2$ werden die 3-dimensionalen Rauheitskenngrößen entsprechend DIN 25178-2 [41] bestimmt. Weiterhin werden nach [226] analog zu den 2-dimensionalen Rauheitskenngrößen R_{hon} und R_{vv} die 3-dimensionalen Gegenstücke S_{hon} (Beschreibung der Honriefen) und S_{vv} (Beschreibung des Ölrückhaltevolumens) gebildet.

$$S_{hon} = \frac{S_k}{(S_{pk} + 0,25S_{vk})} \quad [-] \quad (25)$$

$$S_{vv} = (100 - S_{Mr2}) \frac{S_k}{20} \quad \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{dm}^2} \right] \quad (26)$$

Als Grenzwerte für die 3-D Rauheitskenngrößen werden die der 2-D Kenngrößen übernommen (siehe Tabelle 5), auch wenn die Messwerte aufgrund der unterschiedlichen Datenbasis (Messstrecken versus Messflächen) sowie der auf die 2-D bzw. die 3-D Messungen angepassten Filtermethoden minimal schwanken können.

Ein Kriterium zur indirekten Beurteilung des Ölrückhaltevolumens bietet zudem der an der Laufbahnoberfläche gemessene Porenflächenanteil. Dieser wird einerseits durch die beim thermischen Spritzen verfahrensbedingt hervorgerufene Porosität bestimmt. Andererseits beeinflusst die Qualität der Honbearbeitung, z. B. durch Lamellenausbrüche diesen Kennwert. Für diese Arbeit wird für den an der Laufbahnoberfläche konfokal gemessenen Porenflächenanteil ein Zielwert von 5 % bis 15 % definiert und somit dem Sollwert des im Schliffbild gemessenen Porenflächenanteils zur Charakterisierung des Schichtaufbaus gleichgesetzt. Die automatisierte Porendetektion erfolgt dabei anhand einer Mustererkennung auf Basis von Längen-, Breiten und Tiefenmerkmalen der konfokal gemessenen Oberflächenstrukturen.

Tabelle 5: Grenzwerte der 3-dimensionalen Rauheitskenngrößen

3-D Oberflächenkenngrößen und Grenzwerte für fertiggehone Oberflächen		
Kenngröße	Grenzwert	Norm
S_{pk} [μm]	$S_{pk} \leq 0,35$	Norm DIN EN ISO 25178-2 [41]
S_k [μm]	$S_k \leq 0,6$	Norm DIN EN ISO 25178-2 [41]
S_{vk} [μm]	$1,4 \leq S_{vk} \leq 3,6$	Norm DIN EN ISO 25178-2 [41]
S_{Mr1} [%]	-	Norm DIN EN ISO 25178-2 [41]
S_{Mr2} [%]	-	Norm DIN EN ISO 25178-2 [41]
S_{hon} [-]	$0,3 \leq S_{hon} \leq 0,8$	-
S_{vv} [mm^3/dm^2]	$0,5 \leq S_{vv} \leq 3,5$	-

4.4.3 Verschleißmessung an den Honleisten

Ein weiteres Kriterium zur Beurteilung der Effizienz des Honprozesses sind die Verschleißuntersuchungen an den eingesetzten Honleisten sowie Hartmetallstützleisten. Die Verschleißmessungen werden zur Vermeidung größerer Messungenauigkeiten zu Beginn und am Ende einer Versuchsreihe unter Raumtemperatur (20°C) mit einer Bügelmessschraube an mehreren Messstellen durchgeführt und anschließend auf die Bearbeitung einer Zylinderbohrung bezogen. Als Zielwert wird eine Honleistenstandzeit von mindestens 1000 Bohrungen angestrebt. Dies entspricht einem maximal zulässigen Honleistenverschleiß von 3 μm je Bohrung. Im Rahmen dieser Arbeit wird als Verschleißgröße lediglich die Schneidbelagshöhe herangezogen. Abbildung 33 zeigt die für die unterschiedlichen Honleisten definierten Messstellen.

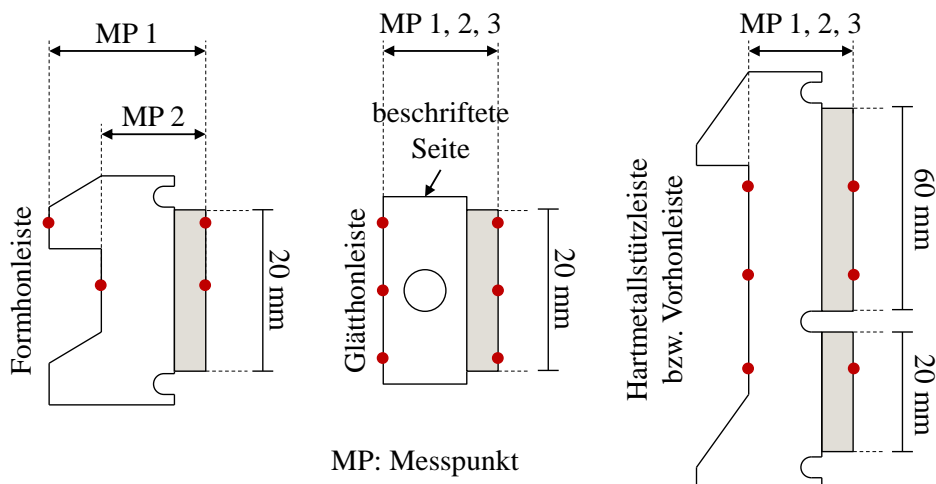
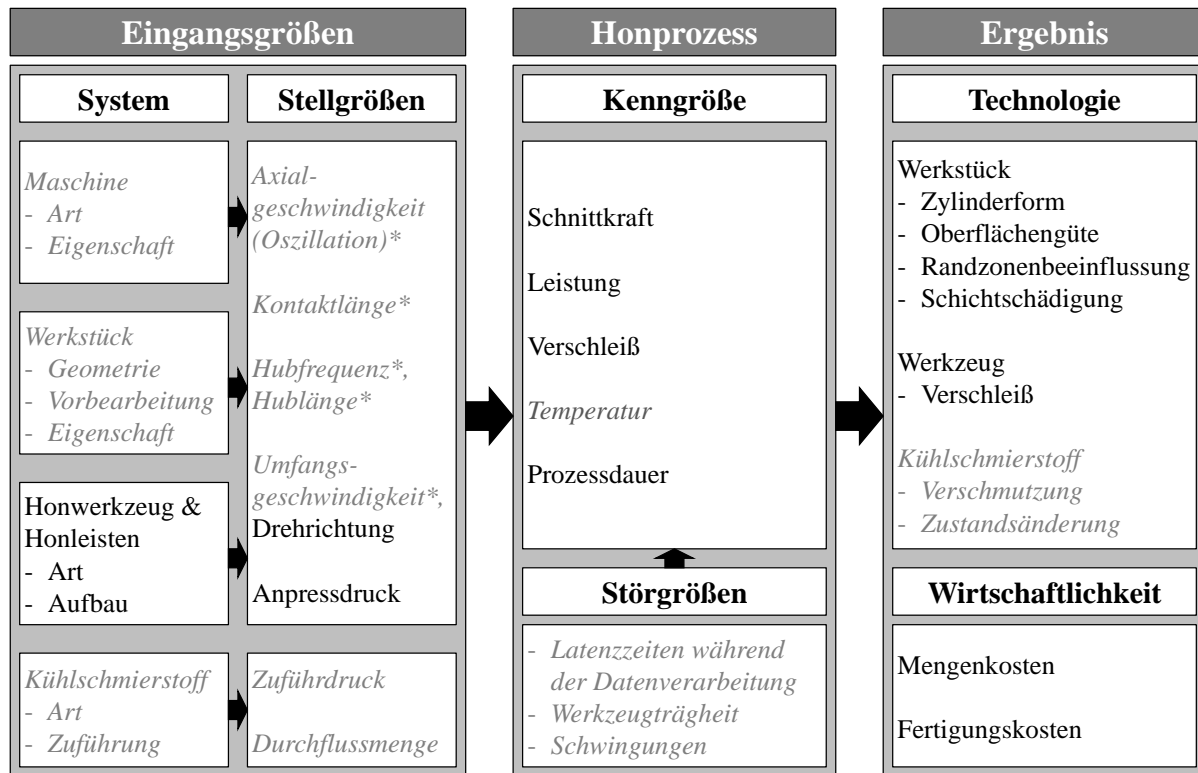


Abbildung 33: Messpunkte Honleistenverschleiß bzw. Stützleistenverschleiß

Das definierte Anlegen des bestückten Honwerkzeugs in einer auf Raumtemperatur temperierten Referenzbuchse bietet ebenfalls die Möglichkeit der Verschleißfassung. Aufgrund von Nachgiebigkeiten von Werkstück und Werkzeug ist ein Monitoring des Anlegewertes zur Verschleißüberwachung bei solch geringen Stückzahlen unzureichend. Das Wiegen vor und nach einer Versuchsreihe scheidet als Methodik der Verschleißmessung ebenfalls aus, da es durch das sehr geringe Gewichtsdelta zu großen Messungenauigkeiten kommt.

4.5 Versuchsprogramm

Abbildung 34 zeigt die Eingangs-, Kenn- sowie Ergebnisgrößen des im Rahmen dieser Arbeit behandelten Formhon-Versuchsprogramms. Weiterhin sind Konstanten und Variablen des Versuchsprogramms gekennzeichnet.



*) Axialgeschwindigkeit, Kontaktlänge, Hubfrequenz, Hublänge und Umfangsgeschwindigkeit gehen entsprechend des Kontaktzeitmodells nach Wiens als Quasikonstanten in die Versuchsplanung ein.

■ Versuchskonstanten

■ Versuchsvariablen

Abbildung 34: Versuchsmethodik – Darstellung in Anlehnung an Klocke und König [115]

Der Fokus der Versuche liegt auf der Variation der Honleistenspezifikation (Systemgröße), Drehrichtungsanpassung (Stellgröße) sowie der Variation und messtechnischen Ermittlung des Honleistanpressdrucks (Stellgröße). Wie in Kapitel 4.3 beschrieben, erfolgt die Auslegung des Formhonprozesses nach dem Kontaktzeitmodell von Wiens [262]. Das Kontaktzeitmodell ermittelt in Abhängigkeit von den Systemgrößen die passenden kinematischen Bearbeitungsparameter. Diese gehen als Quasikonstanten in die Versuchsplanung ein und werden in dieser Arbeit nicht näher untersucht. Der methodische Ansatz sowie die Versuchsfolge zur Entwicklung eines Form- und Glätthonprozesses werden im Folgenden beschrieben.

Anwendung des Stands der Technik auf thermischen Spritzschichten

Im Rahmen dieses Versuchs wird das in [262] dargestellte Formhönverfahren erstmalig auf thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen angewendet. Ziel dabei ist es, für eine definierte Prozesszeit t_p , gleichbleibende Schneidmittel und Bearbeitungsparameter eine Aussage über die Leistungsfähigkeit des Formhönsystems und die Bearbeitungsqualität zu treffen sowie mögliche Störgrößen zu identifizieren. Hierfür werden das Zerspanvolumen, die radiale Formausprägung und Rauheitskenngrößen erfasst sowie die Formtreue der gemessenen Istform bestimmt. Der Begriff der Formtreue soll hierbei als phasengleiche Abbildung der harmonischen Zustellmatrizen in der Zylinderbohrung verstanden werden.

Steuerungsseitige Prozessoptimierung

Folgende steuerungsseitige Maßnahmen sollen untersucht und bewertet werden, um die Oberflächenrauheit formgehonter Zylinderlaufbahnen verbessern zu können:

1) Zeitliche Skalierung der Ansteuermatrizen zur Reduktion der Schnittkräfte

Charakteristisch für das Formhön sind die über der Honzeit ungleichmäßigen Prozesskräfte. Diese wechselnden Prozesskräfte resultieren aus den orts aufgelösten unterschiedlichen Zustellwegen der Honleisten bzw. den verschiedenen Ansteuerspannungen. Durch Auslenkung der Honleisten gegen die entsprechenden Werkstückstellen wird in Abhängigkeit des strukturdynamischen Verhaltens von Werkzeug und Werkstück die Honleistennormalkraft F_N aufgebaut. Die Honleistennormalkraft F_N fällt über der Bearbeitungszeit ab. Einen Ansatz zur Regulierung der Honleistennormalkräfte stellt das Skalieren der Ansteuermatrizen über der Honzeit dar. Dies soll einerseits die aus der Honleistenzustellung resultierenden Bearbeitungskräfte reduzieren und begrenzen, andererseits sollen dadurch die orts aufgelösten Prozesskräfte möglichst konstant gehalten werden.

2) Anpassung der Richtungswechselfolge und –anzahl bei der Honbearbeitung

Nach Wiens [262] ist zur phasengetreuen Einbringung der Zielformen ein Drehrichtungswechsel nach der Hälfte der Honzeit sowie ein drehrichtungsabhängiger Korrekturwinkel erforderlich. Diese Maßnahmen führen zu einer Verringerung der Phasenfehler, welche durch die Trägheiten des Maschinen- und Werkzeugsystems entstehen. Bezogen auf die Schneidleisten führt die gewollte Drehrichtungsänderung zu einem erhöhten Selbstschärfefeffekt der Schneidleisten. Daher sind Richtungswechsel bei der Honbearbeitung weiterhin erforderlich. Im Hinblick auf die Oberflächentopographie

der Zylinderlaufbahnen gilt es jedoch die Anzahl der Richtungswechsel zu reduzieren. Die optimale Richtungswechselfolge und –anzahl werden in diesem Versuch ermittelt.

3) Variation des Zerspanvolumens an der Bohrungseingestelle beim Formhonen

Die Beurteilung der Oberflächentopographie an den Bohrungseingestellen ist von entscheidender Bedeutung, da diese die geringste diametrale Zerspanmasse über den gesamten Honprozess aufweisen. An der Engstelle muss eine Mindest-Zerspanmasse erzielt werden, um die geforderte Oberflächengüte zu erreichen und die Rauheit des vorausgegangenen Honschritts zu egalisieren. Das Zerspanvolumen an der Bohrungseingestelle wird dabei durch das eingesetzte Schneidmittel, die Honzeit und den vorherrschenden Honleistenanpressdruck beeinflusst. Der Honleistenanpressdruck an der Engstelle wird durch den Anlegewert der Formhonleisten an der Bohrungswand bestimmt, da die Ansteuerspannung p_{Soll} hier Null beträgt. Im Versuch soll durch Variation des Anlegewertes die Oberfläche an der Bohrungseingestelle beeinflusst werden.

4) Variation des Anpressdrucks bei der Glätthonbearbeitung

Die Glätthonbearbeitung stellt die finale Funktionsfläche her. Durch gezielte Auswahl der eingesetzten Federelemente sollen bei gleichbleibender Glätthonzeit der Honleistenanpressdruck und das erzielte Zerspanvolumen beeinflusst werden. Ziel der Versuchsreihe ist es, eine für die Honbearbeitung von LDS-Schichten optimierte Oberflächentopographie zu erzeugen. Die Glätthonung darf dabei keinen Einfluss auf die beim Formhonen erzielte Zylinderform nehmen. Das bedeutet, dass bei der nachlaufenden Glätthonbearbeitung ein konstanter Honleistenanpressdruck eine homogene Zerspanmasse gewährleisten muss.

Schneidmittelvariation

Es wird postuliert, dass die Schneidmittelspezifikation das Bearbeitungsergebnis hinsichtlich Zerspanleistung und Oberflächenbeschaffenheit von LDS-Schichten beeinflussen kann. Für die Schneidmittelauswahl beim Formhonen müssen die geringe Anzahl an Honleisten, die reduzierte wirksame Schneidbelagsfläche und die geforderten geringeren Schnittkräfte zur Vermeidung von Schichtschädigungen berücksichtigt werden. Ziel dieser Versuchsreihe ist es, aus vordefinierten Schneidmitteln jene Kombination zu ermitteln, welche im Versuch die höchste Qualität aufweist. Der Qualitätsbegriff beinhaltet dabei die Ergebnisgrößen Honleistenverschleiß, radiale Formausprägung, erzieltes Zerspanvolumen / Zerspanleistung sowie Oberflächentopographie. Es ergibt sich ein Bedarf an schneidfreudigen und verschleißarmen Schneidmitteln. Die ausgewählten Schneidmittel sollen in einer vorgegebenen Taktzeit und –

anzahl eine Sollform erzeugen, welche die geforderten Oberflächenkenngrößen (Kapitel 4.4.2) erfüllt.

Normalkraftmessung an der Formhonleiste

Aufgrund des nicht-linearen Übertragungsverhaltens der verwendeten Zustell- und Werkzeugeinheit kann im vorliegenden Formhonprozess die radial wirkende Komponente der Honkraft nur geschätzt werden. Da diese Kraftkomponente nach dem aktuellen Stand der Technik einen erheblichen Einfluss auf die Oberflächenqualität gehonter Spritzschichten hat, müssen die real anliegenden Honleistenanpressdrücke in einem vorgegebenen und zulässigen Intervall liegen. Die Versuchsplanung zur In-Prozess-Messung wird dabei in folgende Teilschritte untergliedert:

- Bestimmung der maximalen Honleistenauslenkung im unverspannten Zustand in Abhängigkeit der Zustellfrequenz
- Integration eines piezoelektrischen Sensors zwischen Tragleiste und Honleiste
- Kalibrierung der neuen Kraftmessleiste
- Durchführen quasistatischer Kraftmessversuche gegen einen Referenzsensor zur Validierung des Messsystems sowie zur Beurteilung des Übertragungsverhaltens im Formhonwerkzeug
- Erfassung und Analyse der real anliegenden Honleistennormalkräfte während der Formhonbearbeitung

Ableitung einer optimierten Prozessstrategie

Alle in dieser Arbeit entwickelten und beschriebenen Versuche sollen miteinander kombiniert werden, um eine bestmögliche Bearbeitungsqualität zu erzielen. Die Änderungen betreffen neben der Verringerung der Gesamtprozesszeit t_p folgende Prozesseingriffe:

- Beeinflussung der Prozesskräfte beim Formhonen mittels zeitlicher Skalierung der Ansteuerspannungen
- Integration einer In-Prozess-Kraftmessmethodik zur Optimierung der Skalierungsschrittweite
- Änderung der Drehrichtungsfolge der Honspindel sowie Reduktion der Richtungswechselanzahl
- Variation des Zerspanvolumens an der Bohrungseingstelle
- Variation der Federhärte während der Glätthonbearbeitung
- Anpassung der Schneidmittelspezifikation innerhalb der einzelnen Honschritte

5 Steuerungsseitige Prozessoptimierung

Die in diesem Kapitel dargestellten Versuche umfassen die Vorbearbeitung der Versuchsträger, die Anwendung des bestehenden Formhonorprozesses auf thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen sowie die Variation von Honleistenanpressdruck, Spindeldrehrichtung und minimalem Zerspanvolumen.

5.1 Vorbearbeitung der Versuchsträger

Der positionsgehonte Ausgangszustand der Versuchsträger ist für den sofortigen Versuchseinsatz (Formhonen) ungeeignet. Dies kann durch die gegenüber fertigbearbeiteten Zylinderbohrungen vergleichsweise hohen Zylinderformtoleranzen begründet werden. Ein vergleichbarer Ausgangszustand ist somit nicht gegeben. Durch einen Vorhonorprozess können die Versuchsträger (Kapitel 4.1.2) zylindrisch egalisiert und so konstante und möglichst kleine Zylinderformabweichungen und Rundheiten erzielt werden. Zusätzlich werden bei der Vorbearbeitung vergleichbare Oberflächen erzeugt. Die zylindrische Vorhonorung kann als zeitgesteuerter Honprozess beschrieben werden, dessen Prozessparameter in Tabelle 6 dargestellt sind.

Tabelle 6: Prozessparameter des zeitgesteuerten Vorhonorprozesses

Prozessparameter Vorhonen / zylindrisches Egalisieren	
Anzahl Honleisten	8
Dimensionen Honleisten [mm]	3,00 x 4,00 x 80,00 x 3,00 Breite x Höhe x Länge x Belagshöhe (siehe Abbildung 35)
Honleistenspezifikation	D64 (Diamant) Hartmetallbindung Konzentration: 5,5 Kt/cm ³
Drehzahl n [1/min]	180 min ⁻¹ , Rechtslauf
Hubgeschwindigkeit v_H [m/min]	15 m/min
Hubbeschleunigung a_H [m/s ²]	10 m/s ²
Honzeit t_h [s]	20 s
Zustelldruck der EMZ	1 kN
Nachstellen der Honleisten	1 µm/s

Die Abmessungen und Form der verwendeten Honleisten sind in Abbildung 35 dargestellt.

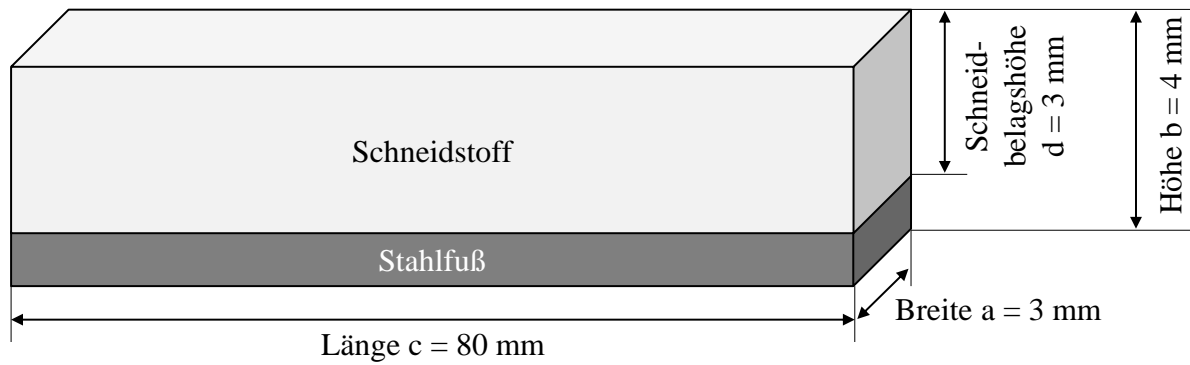


Abbildung 35: Abmessungen Honleiste zum zylindrischen Vorhonen

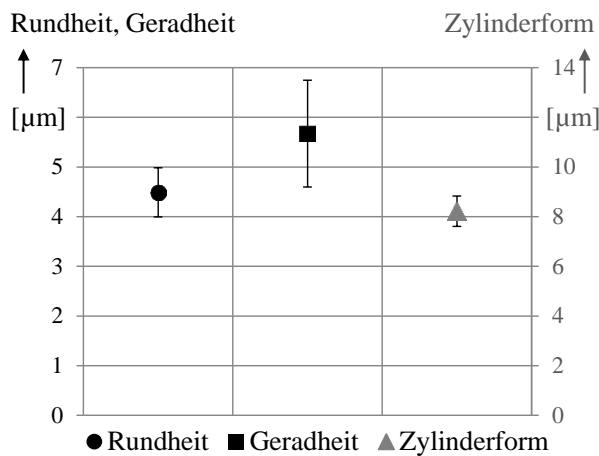


Abbildung 36: Ausgangszustand der Versuchsträger nach Vorhonenbearbeitung – Form

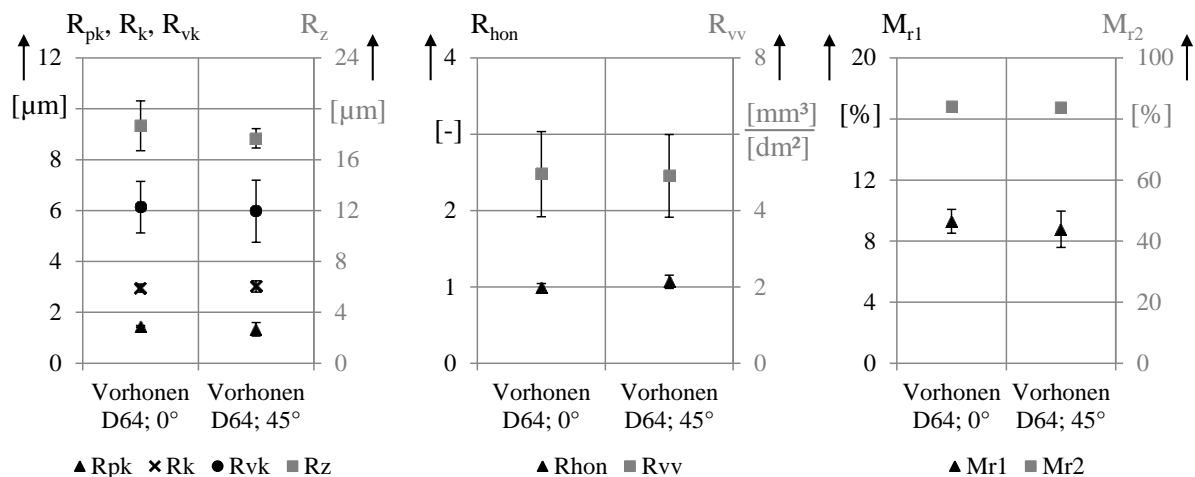


Abbildung 37: Ausgangszustand der Versuchsträger nach Vorhonenbearbeitung – Rauheit

Abbildung 36 sowie Abbildung 37 zeigen die Ergebnisse der standardisierten Vorhonenbearbeitung. Gegenüber dem Anlieferzustand (siehe Kapitel 4.1.2) konnten die Zylinderformabweichungen deutlich reduziert (Rundheit positionsgelont $< 20 \mu\text{m}$; Rundheit vorgehont $< 5 \mu\text{m}$) und vergleichbare Oberflächen hergestellt werden. Aufgrund der Prozessstabilität sowie der

vergleichbaren Ergebnisgrößen stellt die Vorhonorbeitung der Versuchsträger die Grundlage für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen dar.

5.2 Anwendung des Stands der Technik auf thermischen Spritzschichten

Teilergebnisse dieses Kapitels wurden bereits unter [47] veröffentlicht. Der Versuch ist wie im Folgenden beschrieben definiert.

5.2.1 Versuchsbeschreibung

Das bestehende Formhonorverfahren der Fa. Gehring, welches für die Bearbeitung von Grauguss-Laufflächen ausgelegt ist, wird auf thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen angewendet. In je zwei Form- und Glätthonstufen sollen nach einem vorangeschalteten Vorhonprozess (Kapitel 4.1.2) für unterschiedliche Zustellmatrizen (Harmonische nullter und zweiter bis vierter Ordnung) die erzielten Honergebnisse hinsichtlich Form- und Oberflächengüte bewertet werden.

Die vorgegebene Prozesszeit t_p der Unrundbearbeitung kann in insgesamt vier Maschinentakte – je zwei Arbeitstakte Form- und Glätthonen – untergliedert werden. Diese arbeiten mit unterschiedlichen Schneidmitteln und werden fortan als Formhonen I, Formhonen II, Glätthonen I sowie Glätthonen II bezeichnet. Für gängige Spindeldrehzahlen n von ca. 300 min^{-1} und Hubbeschleunigungen a_H bis 20 m/s^2 wird mittels des in [262] veröffentlichten Kontaktzeitmodells als Grenzwert eine Taktzeit t_{takt} von 35 s definiert. Weiterhin erfolgt eine Vernachlässigung der Taktnebenzeit t_m . Da auf der verwendeten Versuchs-Formhonormaschine zur Vermeidung von Eigenschwingungen lediglich Hubbeschleunigungen bis 10 m/s^2 (bei $v_H = 20 \text{ m/min}$) realisierbar sind, erfolgt für diese Arbeit eine Ausweitung der Taktzeit auf 45 s bei gleichbleibender Anzahl an vollständigen Überdeckungen je Honstufe.

Die Formhonorbearbeitung erfolgt auf Basis des Kontaktzeitmodells nach Wiens [262], wonach aus den Eingangsgrößen Bohrungsradius r_B , Hublänge l_H , Hubgeschwindigkeit v_H und -beschleunigung a_H sowie des zurückgelegten Winkels je Doppelhub $\varphi(t_{DH})$ die Bearbeitungsparameter berechnet werden. Diese Parameter sind in Tabelle 7 aufgelistet. Die mathematisch ermittelte Anlegekraft der Formhonorleisten an der Bohrungseingangsstelle zu Prozessbeginn beträgt $p_{AN} = 0,91 \text{ MPa}$, die der Hartmetallstützleisten $p_{AN_{St}} = 0,40 \text{ MPa}$. Der Arbeitsbereich der Glätthonsegmente wird reproduzierbar bestimmt, indem diese zunächst gänzlich gegen die Bohrungswand ausgelenkt und anschließend um $1000 \text{ }\mu\text{m}$ je Element im Radius rückgestellt werden. Der Gesamtfederweg der unverspannten Federn beträgt ca. 3 mm.

Tabelle 7: Versuchsparmeter – Anwendung des Formhonens auf LDS-Schichten

Formhonen - Eingangsgrößen		Formhonen - Berechnungsgrößen	
Eingangsgröße / Parameter	Wert	Parameter	Wert
Bohrungsradius r_w [mm]	42	Drehzahl n [1/min]	226,5
Hublänge l_H [mm]	128,9	Honwinkel α berechnet [°]	37
Hubgeschwindigkeit v_H [m/min]	20	Zeit je Doppelhub t_{DH} [s]	0,85
Hubbeschleunigung a_H [m/s²]	10	Doppelhübe je Überdeckung	5
Zurückgelegter Winkel je Doppelhub $\varphi(t_{DH})$ [°]	1152	Zeit je vollständiger Überdeckung $t_{ÜD}$ [s]	4,25
weitere Konstanten		Anz. vollst. Überdeckungen	10
Anzahl Formhonleisten	4	Drehrichtungswechsel aktiv	ja
Anzahl Hartmetallstützleisten	8	Hondauer je Drehrichtung [s]	21,25
Anzahl Glätthonleisten	12	Gesamthondauer t_h [s]	42,5
Kühlschmierstoff			
Honöl: Castrol Honilo 981, high performance neat cutting oil			
Schneidmittel			
Formhonen I	Formhonen II	Glätthonen I	Glätthonen II
D172 (Mischkorn)	D35	D30	D15
4 x 4 x 20 x 3 [mm]	4 x 4 x 20 x 3 [mm]	4 x 4 x 20 x 3 [mm] Feder: $D=11,9$ N/mm	4 x 4 x 20 x 4 [mm] Feder: $D=11,9$ N/mm
Korntyp, Bindungsart, Füllstoffgehalt und Schneidmittelkonzentration gehen als Konstanten in die Versuchsplanung ein und werden auch darüber hinaus nicht variiert.			
Die Körnung D172 entspricht nicht dem FEPA-Standard nach [256] und [170], sondern stellt eine interne Firmenbezeichnung der Firma Diato dar, welche eine Mischkörnung mit einem D126 als Grundschnaidstoff bezeichnet.			
Glätthonen I / Glätthonen II: Honparameter			
$n = 160$ U/min	$v_H = 15$ m/min	$a_H = 10$ m/s²	$t_h = 42$ s
		Wechsellauf: aktiv	

Die Ansteuerspannungen, dargestellt in Abbildung 38, werden über der Zylinderhöhe konstant gehalten. Dargestellt werden zylindrische Bohrungsaufweitungen mit abgestuften Ansteuerspannungen. Darüber hinaus werden Spannungssignale zweiter bis vierter Fourierordnung vorgegeben, wobei die Ansteuerwerte dieser sinusoidalen Sollformsignale zwischen 0 V (0 %) und 10 V (100 %) alternieren. Die Wellenlängen λ_n betragen für die Ovalisierung

$\lambda_1 = 1/2$ Bohrungsumfang, für die Harmonische dritter Ordnung $\lambda_2 = 1/3$ Bohrungsumfang sowie für die Kleeblattform $\lambda_3 = 1/4$ Bohrungsumfang.

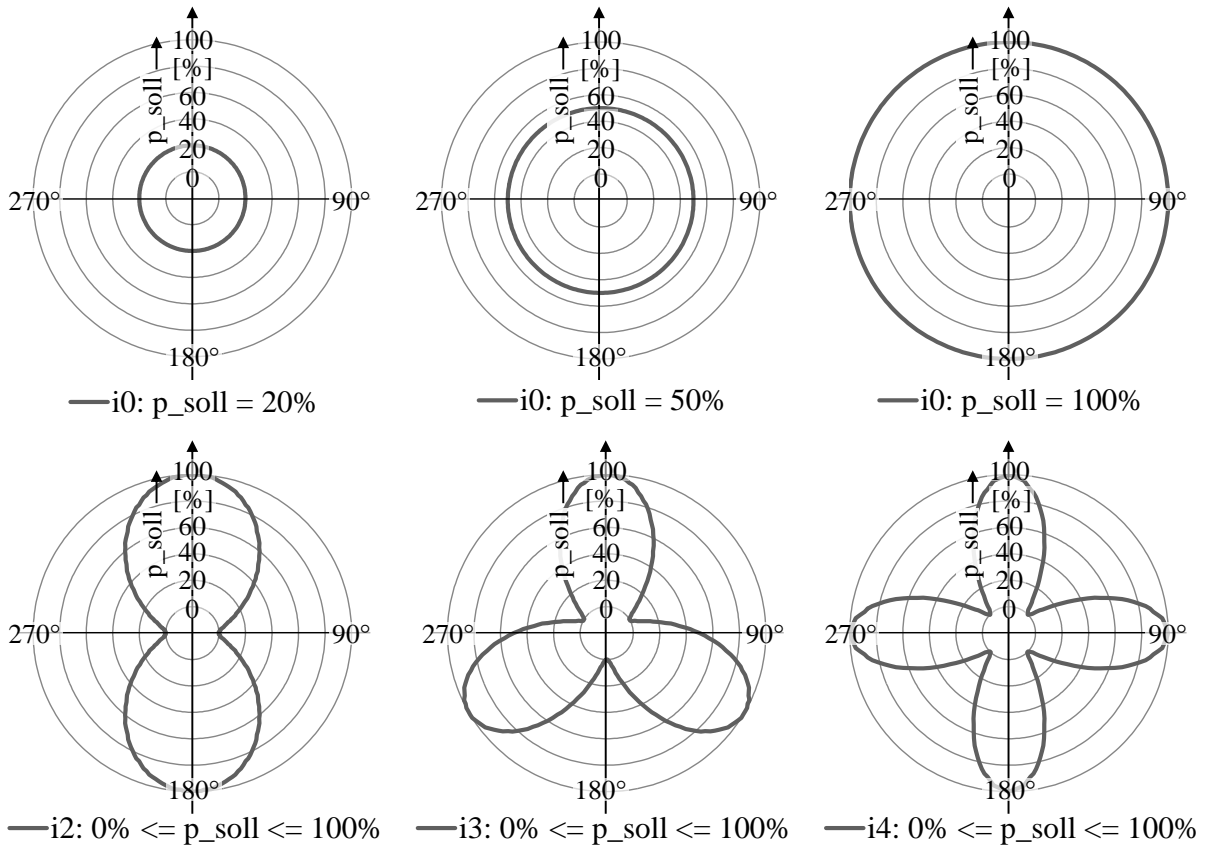


Abbildung 38: Ansteuerspannungen - Variation i0, i2, i3 und i4

5.2.2 Formgüte bei der Bearbeitung harmonischer Sollformen

Entsprechend der Versuchsbeschreibung erfolgt eine Form- und Glätthonbearbeitung der zylindrisch egalisierten LDS-Zylinderlaufflächen in vier Taktschritten (siehe Kapitel 5.2.1). Die ersten beiden Maschinentakte (Prozessschritte) sind dabei der aktiven Formhonung mit unterschiedlichen Schneidmitteln (Formhonen I: D172 Mischkorn, Formhonen II: D35) vorbehalten; die Takte drei und vier sind im Prozessablauf mit einer nachlaufenden Glätthonung belegt (Glätthonen I: D30, Glätthonen II: D15). Zusätzlich ist ein nach Wiens [262] experimentell ermittelter Versatzwinkel je Spindeldrehrichtung implementiert.

Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen für eine Messebene bei mittlerer Bohrungstiefe die Ergebnisse der Unrundbearbeitung je Honstufe. Bedingt durch die eingesetzte Korngröße werden im ersten Formhonschritt das größte Zerspanvolumen sowie die größte Formausprägung erzeugt. Das Verhältnis der eingesetzten Korngrößen entspricht dabei jedoch nicht dem Verhältnis der in den jeweiligen Prozessschritten erzielten Zerspanvolumina. Als Hauptgrund gilt hier der Abbau der Zustellkraft über der Prozesszeit. Bedingt durch die fehlende automatisierte Nachstellung der Honleisten während des Honvorgangs sowie des größeren Zerspan-

vermögens größerer Schneidkörner, baut sich die Zustellkraft (Normalkraft) an den Schneidleisten während des ersten Formhonschrittes schneller ab. Im Mittel wird bei gegebener Prozesskonfiguration im ersten Formhonschritt ein 2,67-mal größeres Zerspanvolumen gegenüber dem zweiten Formhonschritt erzielt. Die Standardabweichung beträgt dabei 0,19. Bei dieser Betrachtung wird der Sonderfall der dritten Harmonischen als Sollformvorgabe nicht mit einbezogen, sondern separat diskutiert.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	D172
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 21,25 s	Honleisten FH2	D35
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit GL1	2 x 21 s	Honleisten GL1	D30
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit GL2	2 x 21 s	Honleisten GL2	D15

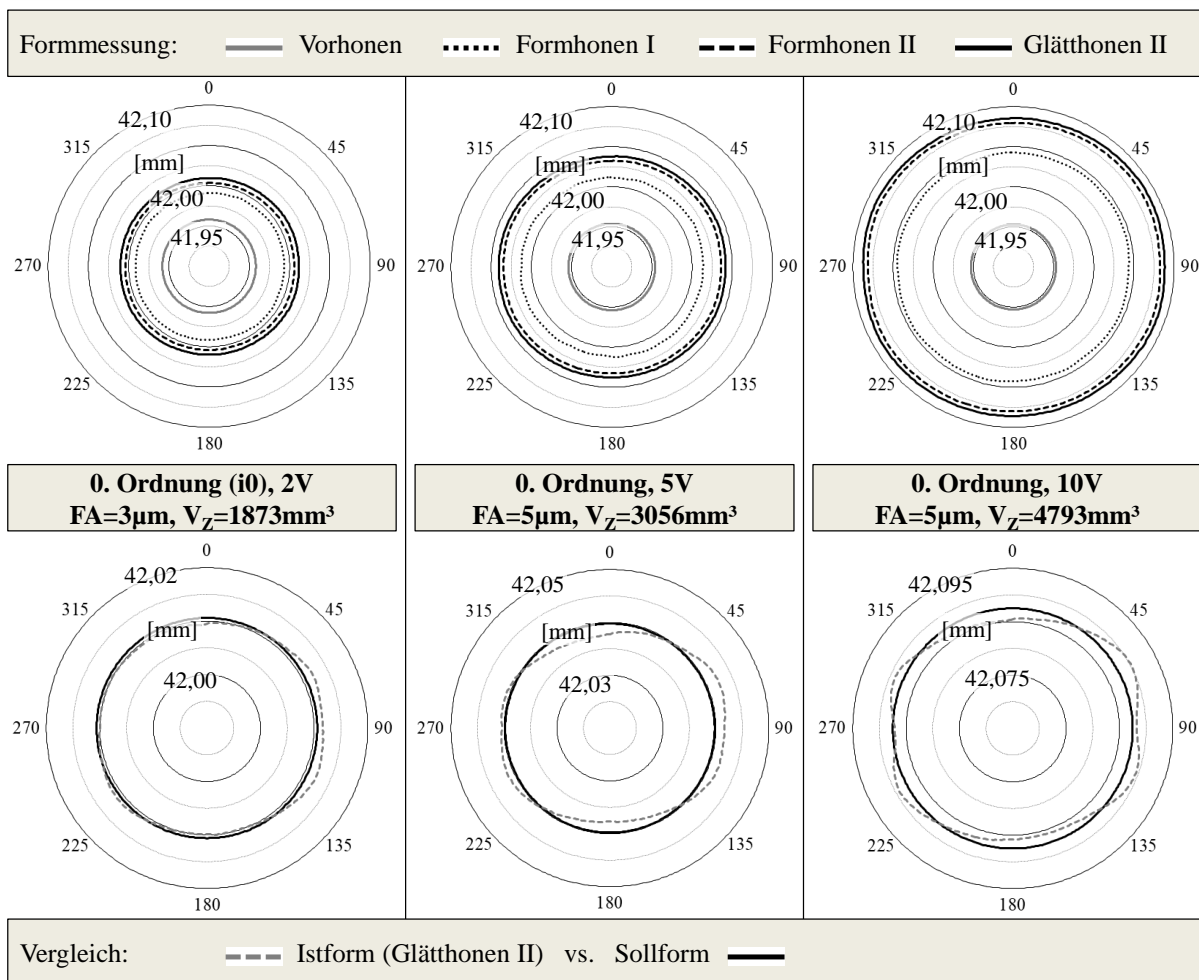


Abbildung 39: Formhonergebnisse der formgehonten harmonischen Sollformen i0

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	D172
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 21,25 s	Honleisten FH2	D35
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit GL1	2 x 21 s	Honleisten GL1	D30
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit GL2	2 x 21 s	Honleisten GL2	D15

Formmessung: — Vorhonen Formhonen I --- Formhonen II — Glätthonen II

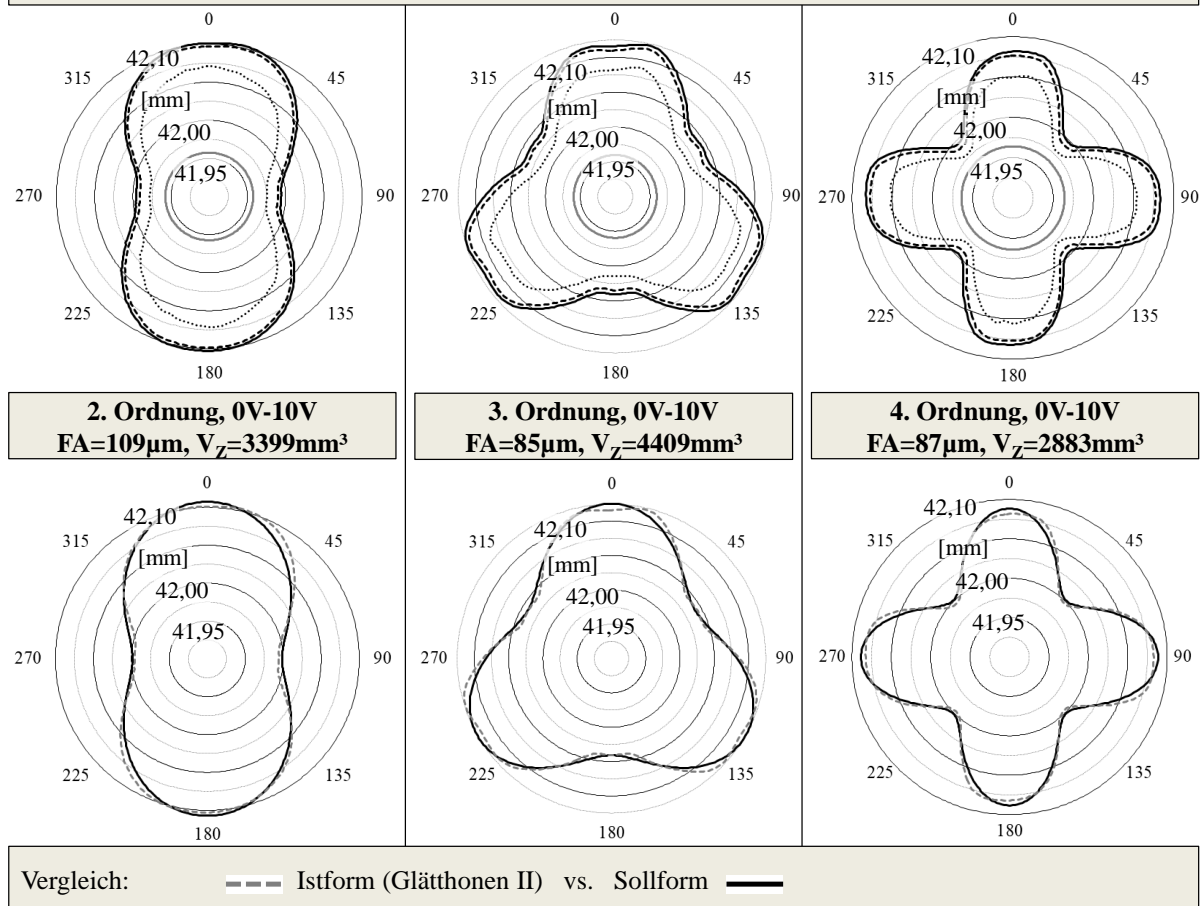


Abbildung 40: Formhonergebnisse der formgehten harmonischen Sollformen i2, i3, i4

Auffällig ist bei der Bearbeitung der dritten Fourierordnung, dass trotz gleicher Spannungsamplitude (0 V – 10 V) sowie gleicher Anlegekraft der Honleisten an der Bohrungswand für diese Bearbeitungsversuche eine gegenüber den anderen Versuchen deutlich größere Zerspanmasse an der Bohrungseingstelle gemessen werden kann. Diese resultiert aus der nicht ausreichenden Abstützwirkung der vier Formhonleisten an der Bohrungseingstelle durch die acht Stützeleisten bei der Bearbeitung harmonischer Sollformen, deren Ordnungszahl ungerade ist. Gleichzeitig begünstigt die werkzeugseitige Anordnung der Formhonelemente eine Bearbeitung harmonischer Sollformen mit gerader Ordnungszahl, da diese eine symmetrische Zu- und Rückstellung gegenüberliegender Formhonleisten garantiert [262].

Werden die drei zylindrisch gehonten Sollformen miteinander verglichen, so fällt auf, dass sich das Zerspanvolumen in Abhängigkeit der angelegten Steuerspannung nahezu linear ent-

wickelt. Für die zugrunde liegende Prozesskonfiguration (Kapitel 5.2.1) konnte so für die gesamthafte Betrachtung der beiden Formhonschritte eine Erhöhung des Zerspanvolumens von ca. 364 mm³ pro 1 V Steuerspannungsänderung ermittelt werden. Dies belegt die hohe Sensitivität des Formhonsystems. Für die Randbereiche des nutzbaren Steuerspannungsintervalls muss diese Quasi-Linearität jedoch unter Berücksichtigung der Werkzeugdynamik überprüft werden (Kapitel 7.2). Zudem können für die Bearbeitung der zylindrisch gehonten Sollformen gegenüber konventionellen Serienhonungen vergleichbare Rundheiten erzielt werden. Mit steigender Ansteuerspannung bzw. wachsendem Honleistenanpressdruck nehmen die Rundheitsfehler jedoch zu. Die Ursache dieser kraftabhängigen Formfehler kann durch die lokal unterschiedliche Nachgiebigkeit des bearbeiteten Kurbelgehäuses begründet werden.

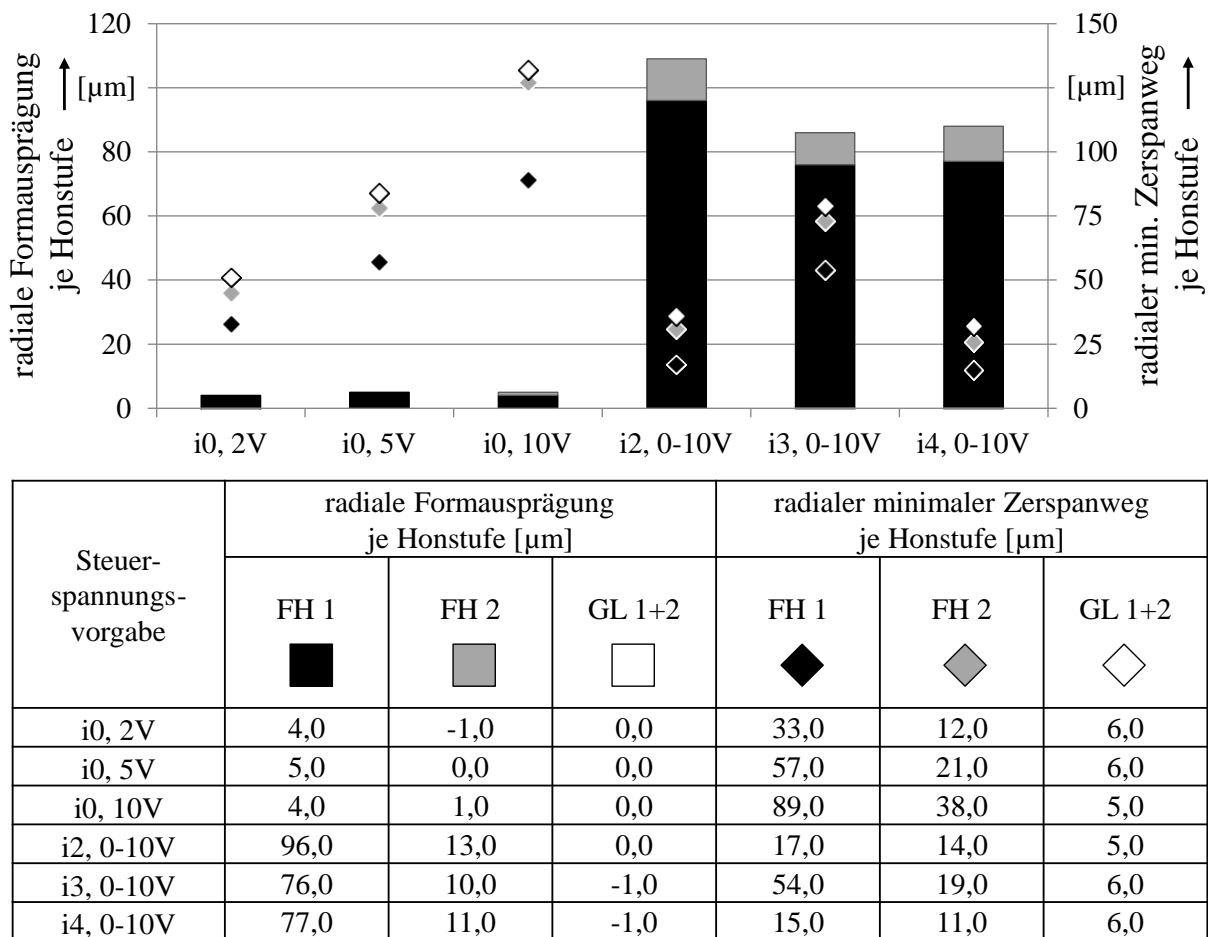


Abbildung 41: Ist-Stand – radiale Formausprägung und minimaler Zerspanweg je Honstufe

Abbildung 41 zeigt diese Rundheitsabweichungen in Form der radialen Formausprägung sowie deren Anteil je Formhonschritt. Bei den Glätthonschritten 1 und 2 erfolgt keine Erhöhung der radialen Formausprägung sondern lediglich eine homogene diametrale Aufweitung der Bohrung ($Q''_w \approx 0$). Darüber hinaus wird die minimale radiale Zerspanmasse an der Bohrungseingestelle dargestellt. Diese entsteht für die Formhonprozessschritte aus der Überlage-

rung des Anlegewertes der Honleisten durch die Grobzustellung sowie der lokal vorherrschenden Ansteuerspannung. Es zeigt sich, dass die erzielte Formausprägung mit steigender Ordnungszahl der jeweiligen Harmonischen sinkt. Die Bearbeitung einer höheren Fourierordnung zeigt sich als Frequenzerhöhung in der Zu- und Rückstellung der Formhonleisten. Diese Frequenzänderung nimmt unmittelbar Einfluss auf das Übertragungsverhalten des Werkzeugs. Ein erstes Indiz zur Beurteilung des Übertragungsverhaltens des Formhonwerkzeugs liefert Abbildung 42, worin die Fourieranteile der drei gehonten Bohrungsgeometrien (i2, i3, i4) inkl. ihrer Amplitude ($FA/2$) und der zugehörigen Phasenlage dargestellt sind. Die Messwerte entstammen einer Rundheitsmessung unter Verwendung des in 4.4.1 dargestellten Incometer. Die Grafik zeigt, dass die Hauptordnungen der Harmonischen mit einem Phasenfehler $< 2^\circ$ dargestellt werden können. Dennoch wird deutlich, dass hier kein ideales Übertragungsverhalten vorliegt. Für die Sollformen Oval, Dreieck und Kleeblatt können insbesondere Formfehler n-facher Fourierordnung identifiziert werden, welche je nach Phasenlage die Flankensteilheit bzw. die Sinusförmigkeit der Amplitudenausprägung beeinflussen. Die Untersuchungen von Wiens [262] zeigen bereits, dass durch Nutzung der in Kapitel 4.3 beschriebenen iterativen Prozessgestaltung die Formgenauigkeit verbessert werden kann.

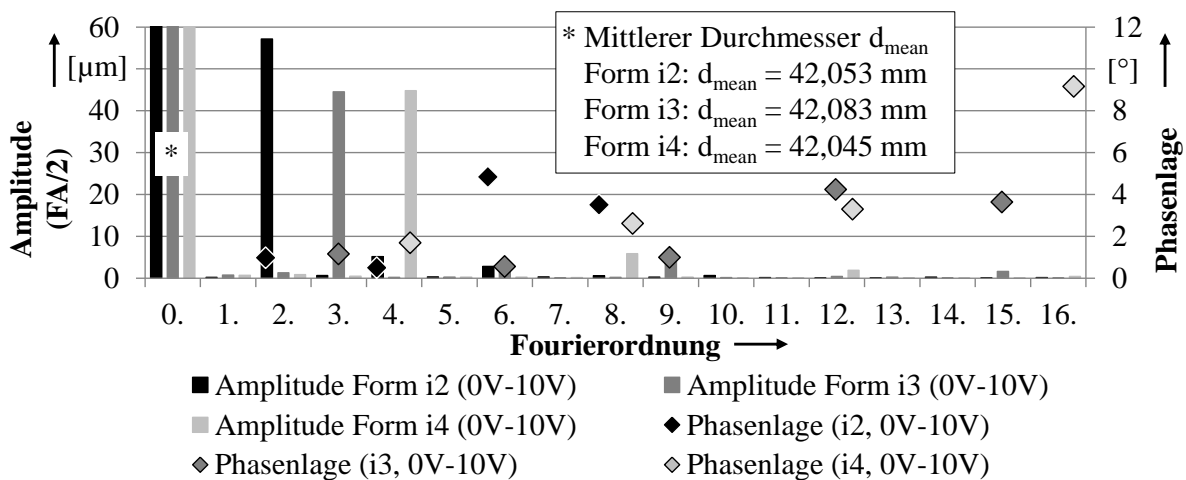


Abbildung 42: Ist-Stand – Fourieranalyse der formgehonten Harmonischen (Incometermessung)

Neben der Analyse der beiden Formhonprozessschritte können auf Basis von Abbildung 41 ebenfalls erste Erkenntnisse zum nachlaufenden Glätthonprozess gewonnen werden. Der Einfluss der Glätthonung auf die zuvor eingebrachte Bohrungsform kann als sehr gering beschrieben werden, da eine so generierte Amplitudenänderung im Bereich $0 \mu\text{m} \leq |AFA| \leq 1 \mu\text{m}$ liegt. Weiterhin kann festgehalten werden, dass die von Wiens et al. [265] beschriebenen unterschiedlichen Rauheitsprofile je Bohrungsposition (in Abhängigkeit der lokal differierenden Honleistenanpressdrücke) keinen signifikanten Einfluss auf die lokale

Zerspanmasse beim Glätthonen nehmen. Weiterhin wird bei der gewählten Prozesskonfiguration unabhängig von der Bohrungsform eine mittlere radiale Zerspanrate von ca. $6 \mu\text{m}$ erzielt. Dies entspricht einem mittleren Zerspanvolumen von ca. 215 mm^3 je Bohrung für die verwendeten Kurbelgehäuse. Im ersten Glätthonschritt werden dabei ca. 180 mm^3 ($Q_w = 4,25 \text{ mm}^3/\text{s}$) zerspannt, die Zerspanmasse für die Kornspezifikation D15 beläuft sich auf ca. 35 mm^3 ($Q_w = 0,85 \text{ mm}^3/\text{s}$). Im ersten Glätthonschritt erfolgt somit eine gezielte Verringerung der Rauheit, während im zweiten Glätthonschritt lediglich die Rauheitsspitzen geglättet werden. Die erzeugten Laufbahntopographien werden im nachfolgenden Kapitel beschrieben und diskutiert.

5.2.3 Oberflächengüte bei der Bearbeitung harmonischer Sollformen

Für die formgehtonen Versuchsträger wird die erzielte Oberflächengüte an den zwei kritischsten Bohrungsstellen (Formextrema: Bohrungsstellen mit minimalem und maximalem Anpressdruck) – Stellen des maximalen (Abbildung 43) und minimalen (Abbildung 44) Zerspanvolumens – erfasst. Werden die Rauheitskennwerte für die zylindrischen Sollformvorgaben miteinander verglichen, so fällt auf, dass diese um den Umfang relativ konstant bleiben und eine für thermisch gespritzte Laufflächen bekannte und charakteristische Streuung aufweisen. Auffällig zeigt sich jedoch, dass sich hinsichtlich der Topographieausprägung ein Optimum im mittleren Steuerspannungsbereich einstellt, da die Rauheitskennwerte mit Ausnahme des R_{hon} für die Steuerspannungskonstanten 2 V (verschlechtertes Schneidverhalten) und 10 V (sehr hohe Honleistenanpressdrücke) ansteigen.

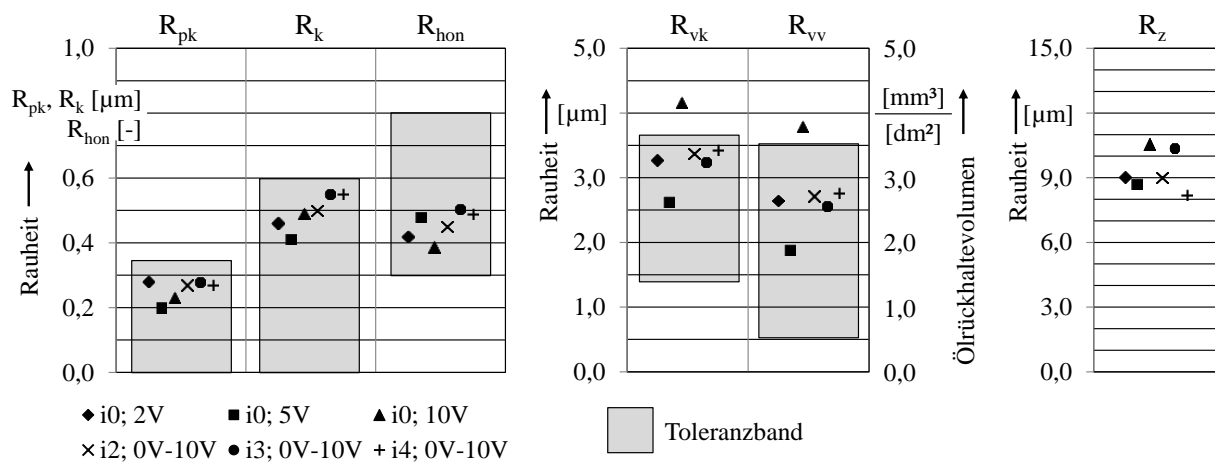


Abbildung 43: Rauheitskenngrößen der formgehtonen harmonischen Sollformen bei max. Formausprägung

Für die Harmonischen zweiter (i2), dritter (i3) und vierter (i4) Fourierordnung steigt der Rauheitskennwert R_{hon} mit sinkender, lokaler Zerspanleistung. Die Annahme einer größer ausgeprägten Honstruktur an den Bohrungsengstellen im Vergleich zu den lokalen Formausprä-

gungsmaxima kann durch Analyse der Faxfilmaufnahmen (siehe Abbildung 45) nicht bestätigt werden. Vielmehr beruht der Anstieg dieses Rauheitskennwertes mathematisch auf der Abnahme der reduzierten Riefentiefe R_{vk} an den Bohrungsengstellen. Diese Unterschiede können mit den lokal unterschiedlichen Honleistenanpressdrücken in Zusammenhang gebracht werden und resultieren vermutlich aus den durch niedrige Flächenpressungen hervorgerufenen geringen Korneindringtiefen des eingesetzten Schneidmittels.

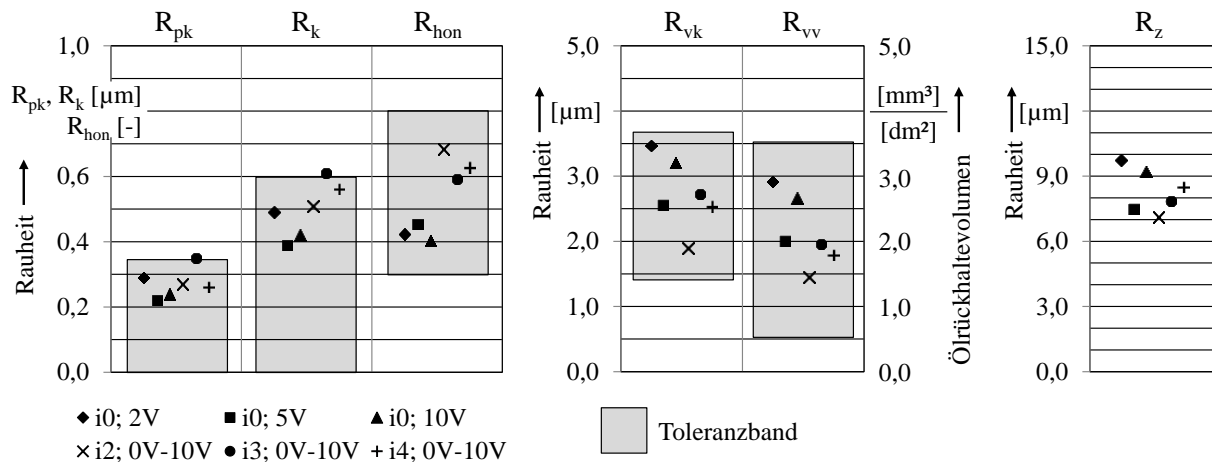


Abbildung 44: Rauheitskenngrößen der formgehonten harmonischen Sollformen an der Bohrungsengstelle

Eine subjektive Beurteilung der formgehonten Laufbahnen kann anhand der in Abbildung 45 dargestellten Faxfilmaufnahmen erfolgen. Die Aufnahmen der Varianten $i0$ bestätigen die Annahme eines hinsichtlich der Topographieausprägung optimalen Spannungsbereiches. Die in der LDS-Schicht enthaltenen Poren können unter optimierten Prozessbedingungen freigelegt und die Anzahl an Schichtschädigungen reduziert werden.

Dies wird auch bei Betrachtung markanter Bohrungspositionen für die Harmonische zweiter Ordnung deutlich. Im Bereich der Bohrungsengstelle (Abbildung 45, unten links) erfolgt kein optimales Schneidverhalten der Diamantkörner, da es hier teilweise zu Materialverschiebungen, Deckelgratbildung oder Zuschmieren von Poren kommt. Diese Deformationen sind im Hinblick auf einen befeuerten Motorbetrieb als kritisch zu bewerten, da diese kleinen Teilchen abbrechen und zu Funktionsstörungen führen können. Weiterhin verursachen die niedrigen Flächenpressungen an diesen Bohrungspositionen aufgrund der geringeren Korneindringtiefe eine schwächer ausgeprägte Riefenstruktur. An den Stellen maximaler Formausprägung bzw. maximaler Spannung (Abbildung 45, unten rechts) nimmt die Anzahl an Schichtschädigungen (Lamellenausbrüche) bedingt durch die hohen Schnittkräfte zu. Vereinzelt finden sich in den Faxfilmaufnahmen auch Hinweise auf tiefe Riefen aufgrund der größeren Eindringtiefe einzelner Schneidkörner. Wie auch die taktilen Rauheitsschriebe zeigen die Fax-

filmaufnahmen im Übergangsbereich (Abbildung 45, unten Mitte) gut freigelegte Poren sowie eine ausgeprägte und gleichmäßige Riefenstruktur.

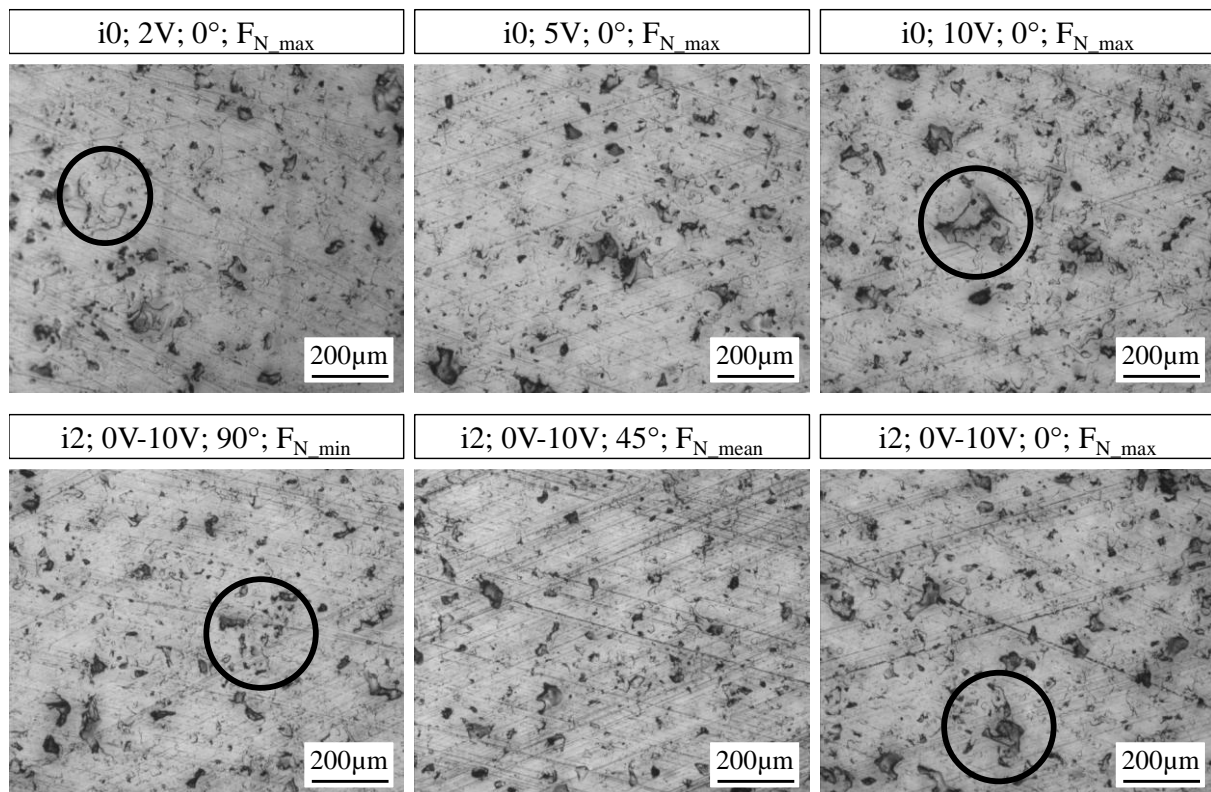


Abbildung 45: Faxfilmaufnahmen der formgehten Harmonischen bei min. und max. Formausprägung

5.2.4 Zusammenfassung – Anwendung des Stands der Technik auf thermischen Spritzschichten

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass das bestehende Formhonsystem bereits ein großes Potential zur Formhonung von thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen bietet. Die geforderte Formgenauigkeit wird erzielt, indem die Erkenntnisse aus [262] auf die hier verwendete Laufbahntechnologie übertragen werden. Folgende Ergebnisse konnten im Rahmen dieses Kapitels gewonnen werden:

- Die gewünschten Sollformgeometrien beim Formhonen thermischer Spritzschichten können durch einen iterativen Formeinrichtprozess bearbeitet werden.
- Das Zerspanvolumen verhält sich in Abhängigkeit der Steuerspannung für den Steuerspannungsbereich von 2 V bis 10 V nahezu linear. Für die Randbereiche des nutzbaren Steuerspannungsintervalls muss diese Linearität unter Berücksichtigung der Werkzeugdynamik sowie des schneidmittelspezifischen Initialdrucks zusätzlich überprüft werden.

- Die erzielbare Amplitude / Formausprägung ist frequenzabhängig. Mit zunehmender Ordnungszahl der Sollform sinkt die erzielbare Formausprägung.
- Der bei der Formhonung resultierende Phasenfehler nimmt mit zunehmender Ordnungszahl zu.
- Der Anpressdruck beim Formhonen beeinflusst die Oberflächentopographie. Faxbildanalysen und Rauheitsmessungen zeigen für den mittleren Steuerspannungsbereich die geringsten Schichtschädigungen.
- Zu hohe Honleistennormalkräfte können die zu honende LDS-Schicht derart schädigen, dass die gewünschte Oberflächentopographie nicht mehr einstellbar ist.
- Der Einfluss des Glätthonens auf die Formausprägung ist für die untersuchte Federhärte vernachlässigbar ($0 \mu\text{m} \leq |\Delta FA| \leq 1 \mu\text{m}$)
- Die definierten Rauheits-Zielwerte werden weitestgehend (aber nicht flächendeckend) im Rahmen ihrer Tolerierung erreicht. Die geforderte Reduktion (Halbierung) der Glätthonzeit zur Einsparung eines Arbeitstaktes bedarf daher weiterer Optimierungsmaßnahmen zur Sicherstellung der Qualitätsziele.

5.3 Skalierung der Ansteuermatrizen

Kapitel 5.2 zeigt, dass bei falscher Prozessauslegung die zu Bearbeitungsbeginn teils sehr hohen Honleistenormalkräfte die zu honende thermische Spritzschicht derart schädigen können, dass die gewünschte Oberflächentopographie (z. B. aufgrund von Lamellenausbrüchen in der LDS-Schicht) nicht mehr einstellbar ist. Einen Ansatz zur Regulierung der Honleistenormalkräfte stellt das Skalieren der Ansteuermatrizen über die Honzeit dar (Druckvariation). Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse wurden bereits teilweise veröffentlicht in [47]. Der Versuch ist wie im Folgenden beschrieben definiert.

5.3.1 Versuchsbeschreibung

Insgesamt können die faktorielle und die äquidistante Skalierung unterschieden werden (Abbildung 46).

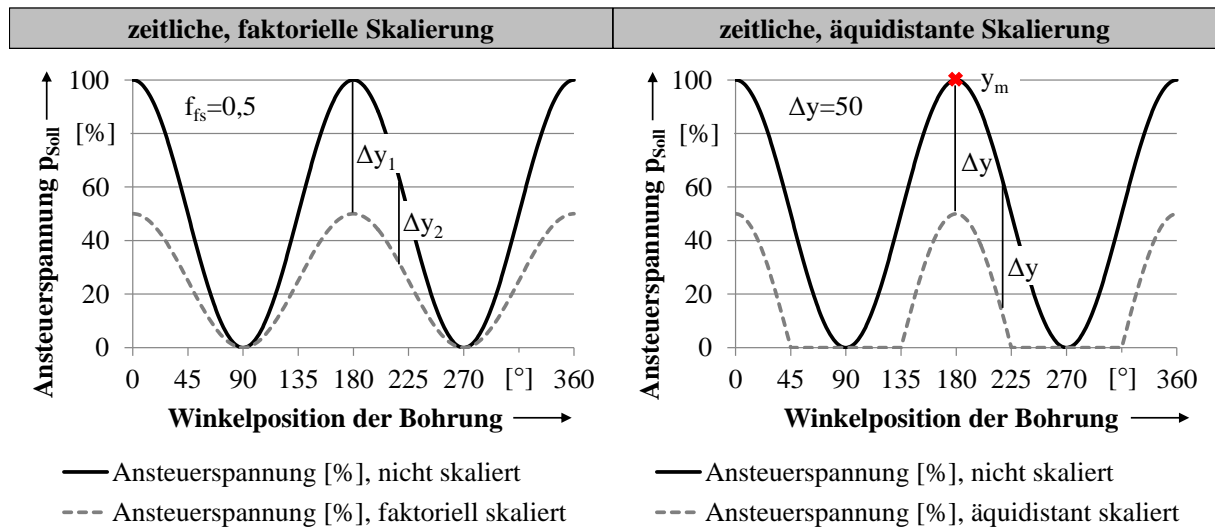


Abbildung 46: Schematische Darstellung der Skalierungsmethoden nach [69]

Bei der faktoriellen Skalierung [47] werden die Ansteuerspannungen der Sollwertmatrix mit einem vorgegebenen Faktor f_{fs} (hier: $0 \leq f_{fs} \leq 1$) multipliziert (Formel 27). Hiermit können zwar die Honleistenormalkräfte deutlich reduziert werden, allerdings stellen sich zwischen zwei Skalierungsstufen keine konstanten Prozesskräfte ein, da die faktorielle Skalierung keinen gleichmäßigen Offset der Sollwertmatrix verursacht.

$$p_{Soll_fakt_skal}(\varphi, h) = p_{Soll}(\varphi, h) \cdot f_{fs} \quad (27)$$

Bei der äquidistanten Skalierung [47] der Ansteuermatrix wird jede Ansteuerspannung zwischen 0 V und 10 V um einen bestimmten Wert Δy (Offset) verringert (Formeln 28 und 29). Daraus resultierende negative Ansteuerspannungen werden auf 0 V gesetzt. Speziell gegen

Ende der Honbearbeitung bzw. ab einer gewissen Vorformphase fördert diese Skalierungsart eine Bearbeitung mit gleichmäßigeren Prozesskräften.

$$p_{Soll_äqui_skal}(\varphi, h) = p_{Soll}(\varphi, h) - \Delta y \quad (28)$$

$$\Delta y = X \cdot y_m \quad (29)$$

mit Faktor $X \in [0, 1]$; $y_m = \text{max. verwendete Ansteuerspannung}$

Für eine Kleeblattform (Harmonische vierter Ordnung) wird – unter Verwendung der faktoriellen und äquidistanten Skalierung – neben der finalen Bohrungsform und Oberfläche die Änderung der radialen Formausprägung FA (siehe Kapitel 2.4.4) je vollständiger Überdeckung erfasst. Gleichzeitig erfolgt eine Beurteilung der Laufbahnoberfläche mittels 2D-Rauheitskennwerten und Faxfilmaufnahmen im Anschluss an jede Honstufe in der Bohrungsmitte bei 0° (max. Formausprägung) und 45° (Bohrungseingestelle). Diese Ergebnisse werden denen einer Referenzbohrung gegenübergestellt, wobei die Referenzbohrung sich lediglich darin unterscheidet, dass keine zeitliche Skalierung der Ansteuerspannungen erfolgt. Dies ermöglicht eine Analyse der Laufbahntopographie unter Berücksichtigung der lokal unterschiedlichen Honleistenanpressdrücke. Die genauen Versuchsparameter inkl. der Skalierungsschritte können Tabelle 8 entnommen werden. Die Auslegung des Formhonprozesses erfolgte dabei mit dem Kontaktzeitmodell ($t_{\dot{v}D} = 4,25$ s). Weiterhin gehen der Kühlschmierstoff, die Anzahl und die Spezifikationen der Schneid- sowie Stützleisten und die Maschinenparameter entsprechend Tabelle 7 als Konstanten in die Versuchsplanung ein.

Tabelle 8: Versuchsplan – zeitliche Skalierung der Ansteuerspannungen

Prozessschritt	Keine Skalierung	Äquidistante Skalierung	Faktorielle Skalierung
0) Vorhonen	zylindrisches Egalisieren gemäß Kapitel 4.1.2		
1) Formhonen I Rechtslauf	Schneidmittel D172 (Mischkorn) $5 \times t_{\text{ÜD}} = 21,25 \text{ s}$		
		$\text{ÜD 1: } \Delta y = 0,9 \times y_m$ $\text{ÜD 2: } \Delta y = 0,8 \times y_m$ $\text{ÜD 3: } \Delta y = 0,7 \times y_m$ $\text{ÜD 4: } \Delta y = 0,6 \times y_m$ $\text{ÜD 5: } \Delta y = 0,5 \times y_m$	$\text{ÜD 1: } f_{fs} = 0,1$ $\text{ÜD 2: } f_{fs} = 0,2$ $\text{ÜD 3: } f_{fs} = 0,3$ $\text{ÜD 4: } f_{fs} = 0,4$ $\text{ÜD 5: } f_{fs} = 0,5$
2) Formhonen I Linkslauf	Schneidmittel D172 (Mischkorn) $5 \times t_{\text{ÜD}} = 21,25 \text{ s}$		
		$\text{ÜD 6: } \Delta y = 0,4 \times y_m$ $\text{ÜD 7: } \Delta y = 0,3 \times y_m$ $\text{ÜD 8: } \Delta y = 0,2 \times y_m$ $\text{ÜD 9: } \Delta y = 0,1 \times y_m$ $\text{ÜD 10: } \Delta y = 0 \times y_m$	$\text{ÜD 6: } f_{fs} = 0,6$ $\text{ÜD 7: } f_{fs} = 0,7$ $\text{ÜD 8: } f_{fs} = 0,8$ $\text{ÜD 9: } f_{fs} = 0,9$ $\text{ÜD 10: } f_{fs} = 1,0$
3) Formhonen II Rechtslauf	D35 $3 \times t_{\text{ÜD}} = 12,75 \text{ s}$		
		$\text{ÜD 11: } \Delta y = 0,5 \times y_m$ $\text{ÜD 12: } \Delta y = 0,4 \times y_m$ $\text{ÜD 13: } \Delta y = 0,3 \times y_m$	$\text{ÜD 11: } f_{fs} = 0,5$ $\text{ÜD 12: } f_{fs} = 0,6$ $\text{ÜD 13: } f_{fs} = 0,7$
4) Formhonen II Linkslauf	D35 $3 \times t_{\text{ÜD}} = 12,75 \text{ s}$		
		$\text{ÜD 14: } \Delta y = 0,2 \times y_m$ $\text{ÜD 15: } \Delta y = 0,1 \times y_m$ $\text{ÜD 16: } \Delta y = 0 \times y_m$	$\text{ÜD 14: } f_{fs} = 0,8$ $\text{ÜD 15: } f_{fs} = 0,9$ $\text{ÜD 16: } f_{fs} = 1,0$
5) Glätthonen I	5.1) 21 s Rechtslauf; Schneidmittel D30; Federrate $D = 11,9 \text{ N/mm}$ 5.2) 21 s Linkslauf; Schneidmittel D30; Federrate $D = 11,9 \text{ N/mm}$		
6) Glätthonen II	6.1) 21 s Rechtslauf; Schneidmittel D15; Federrate $D = 11,9 \text{ N/mm}$ 6.2) 21 s Linkslauf; Schneidmittel D15; Federrate $D = 11,9 \text{ N/mm}$		

5.3.2 Formhonen mit zeitlich konstanten Ansteuerspannungen

Die in Kapitel 5.3.1 beschriebene Referenzbohrung wird nach aktuellem Stand der Technik gemäß Tabelle 8 gefertigt, wobei keine Skalierung der Ansteuermatrix erfolgt. Die Messung der Zylinderform sowie des kleinsten und größten Zylinderdurchmessers erfolgt dabei nach jeder vollständigen Überdeckung (siehe Kapitel 2.4.3; Formhonkonzept Fa. Gehring Technologies GmbH) der Bohrungswand durch die Formhonleisten.

Die Formausprägung der formgehonten Bohrung nach jedem Prozessschritt in Relation zum zylindrisch vorgehonten Bohrungsdurchmesser zeigt Abbildung 47. Dabei wird vor allem der Einfluss der Richtungswechsel im Zusammenwirken mit der Maschinendynamik auf die Formausprägung deutlich. Wird im Rechtslauf gehont, so kann ein negativer Phasenversatz festgestellt werden – erfolgt die Formhonung im Linkslauf, resultiert daraus ein positiver Phasenversatz. Durch die Überlagerung der einzelnen Richtungswechsel und der mit zunehmender Honzeit geringer werdenden Materialzerspanung wird der Phasenversatz jedoch fast vollständig kompensiert ($\Delta\varphi \leq \pm 1^\circ$).

Abbildung 48 zeigt die Durchmesseränderung gegenüber dem Vorhonmaß an der engsten und weitesten Stelle über die gesamte Honzeit sowie die daraus resultierende Formänderung. Dabei fällt auf, dass bereits während der ersten vier Überdeckungen (Formhonen I, Rechtslauf) eine radiale Formausprägung von 51 μm erzielt wird, d.h. 53 % der radialen Formausprägung werden in 25 % der Gesamt-Formhonzeit t_h erzeugt. Dies lässt sich durch die sehr hohen Honleistenanpressdrücke zu Prozessbeginn erklären. Im Anschluss flacht der Anstieg der radialen Formausprägung ab, welche nach 16 Überdeckungen (Formhonen I und Formhonen II) insgesamt 96 μm beträgt. Der zeitlich aufgelöste Verlauf der radialen Formausprägung zeigt den typischen Verlauf eines zeitgesteuerten Honprozesses, bei dem bereits zu Beginn versucht wird, die Schneidleisten auf das Endmaß auszulenken. Für die Schnittkräfte kann zudem ein zeitlich entgegengesetzter Verlauf wie für die radiale Formausprägung angenommen werden.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	D172
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 12,75 s	Honleisten FH2	D35
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit GL1	2 x 21 s	Honleisten GL1	D30
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit GL2	2 x 21 s	Honleisten GL2	D15
Zeit je Überdeckung	4,25 s	keine zeitliche Skalierung der Ansteuerspannungen (Referenzbohrung)			

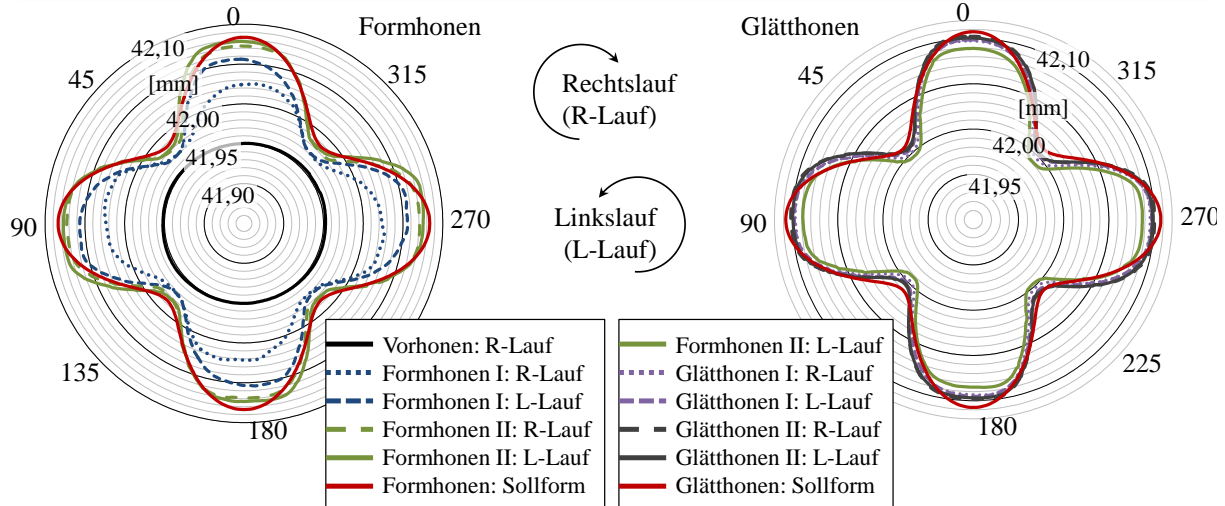


Abbildung 47: Formänderung je Honstufe – ohne zeitliche Skalierung der Steuerspannungen (Referenz)

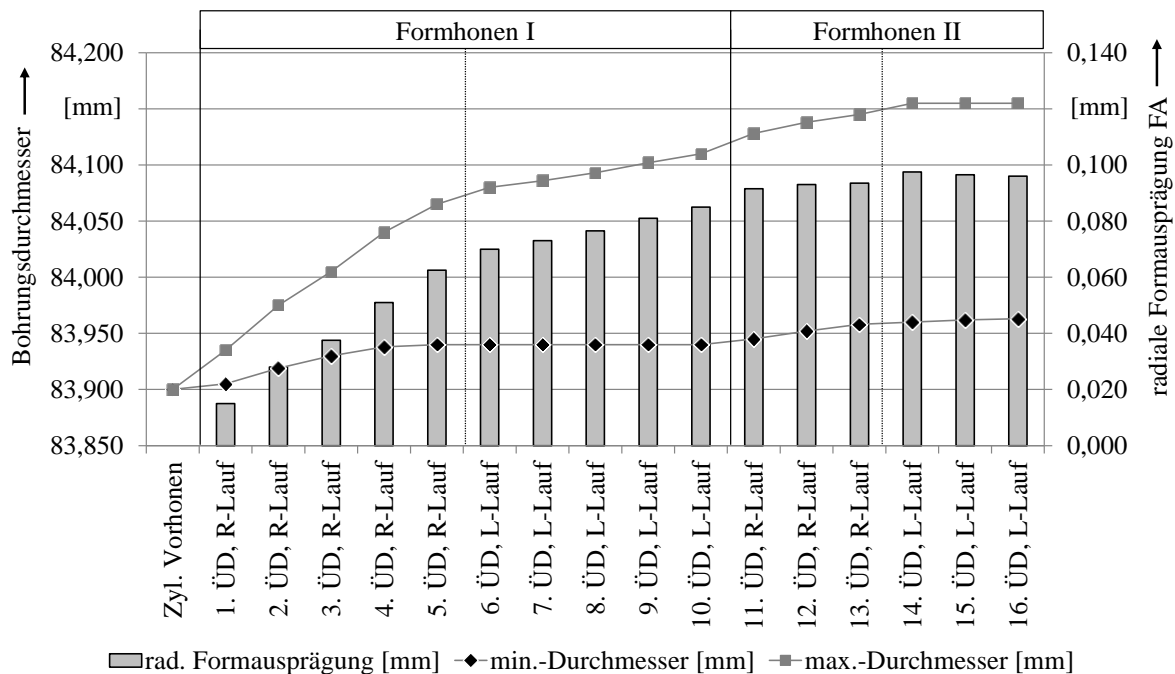


Abbildung 48: Radiale FA je Überdeckung [mm] – Keine zeitliche Skalierung der Steuerspannungen

Wird die Entwicklung des minimalen Bohrungsdurchmessers (Abbildung 48) betrachtet, so fällt auf, dass sich dieser über die Honzeit um 63 μm vergrößert, ohne dass eine aktive Zustellung (Ansteuerspannung = 0 V) der Formhonleisten erfolgt. Diese homogene Zylinderaufwei-

tung ist an allen formgehorten Kurbelgehäusen zu erkennen und auf das Anlegen der Formhonleisten auf die Zylinderlaufbahn und das darauffolgende Freischneiden zurückzuführen. Dies erfolgt jeweils zu Beginn der Arbeitsschritte Formhonen I und Formhonen II. Durch die Vorpositionierung und Verspannung der Formhonleisten mittels der Grobzustellung kann ein reproduzierbarer Startpunkt definiert werden. Die daraus resultierende Normalkraft (trotz 0 V Ansteuerspannung) ermöglicht eine Zerspanung der Ausgangsrauheit an der Bohrungseingestelle (z. B. Abbildung 47, links 45°). Gleichzeitig wird durch den Verzicht einer piezoelektrischen Zustellung an der Bohrungseingestelle der maximale Arbeitsbereich der Piezoaktorik für das Formhonen nutzbar (siehe auch Kapitel 4.2.1). Die anlegekraftabhängige Zylinderaufweitung an der Bohrungseingestelle wird dabei unter dem Begriff „Verlustaufmaß“ geführt. Auffällig ist auch, dass der diametrale Zerspanweg während der letzten drei Überdeckungen an der Engstelle (3 μm) größer ist als an der Stelle maximaler Formausprägung (0 μm). Dies resultiert aus dem sinkenden Honleistenanpressdruck an den Stellen maximaler Formausprägung über der Honzeit t_h .

Abbildung 47 – rechts zeigt die Form- und Durchmesseränderung für den zweistufigen Glätthonprozess, welcher hinsichtlich seiner Konfiguration dem des übernommenen Ist-Standes (Kapitel 5.2) entspricht. Dabei bestätigen sich die Ergebnisse des vorangegangenen Kapitels in der Hinsicht, dass die eingesetzten Federelemente mit einer Federhärte von $D = 11,9 \text{ N/mm}$ aufgrund ihres geringen Zerspanvolumens keinen nennenswerten Einfluss auf die formgehonte Bohrungsgeometrie nehmen.

5.3.3 Formhonen mit zeitlich äquidistanter Skalierung der Steuerspannung

Die im Folgenden diskutierten Formhonergebnisse wurden gemäß Tabelle 8 unter Nutzung äquidistant skalierten Ansteuer matrizen gefertigt. Ziel hierbei ist, eine sollformgetreue Bearbeitung mit gleichmäßigeren und reduzierten Prozesskräften gegenüber der Referenzbohrung (Kapitel 5.3.2) zu ermöglichen. Eine Messung der Prozesskräfte zur Bestätigung der Vermutung erfolgt in Kapitel 7.

Abbildung 49 zeigt die Formausprägung der formgehorten Bohrung nach jedem Prozessschritt. Hier ist ebenfalls der Einfluss der Richtungswechsel auf die Formausprägung erkennbar. Bei näherer Analyse des Formmessschriebs fällt jedoch auf, dass die einzelnen Ausbauchungen im Vergleich zur Referenzbohrung schmaler sind und geringere Formanteile ungleich der vierten Harmonischen aufweisen. Durch die Nutzung der äquidistanten Skalierung wird demnach – verglichen mit der Referenzbohrung – eine sollformgetreue Bearbeitung gefördert.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	D172
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 12,75 s	Honleisten FH2	D35
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit GL1	2 x 21 s	Honleisten GL1	D30
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit GL2	2 x 21 s	Honleisten GL2	D15
Zeit je Überdeckung	4,25 s	zeitlich äquidistante Skalierung der Ansteuerspannungen			

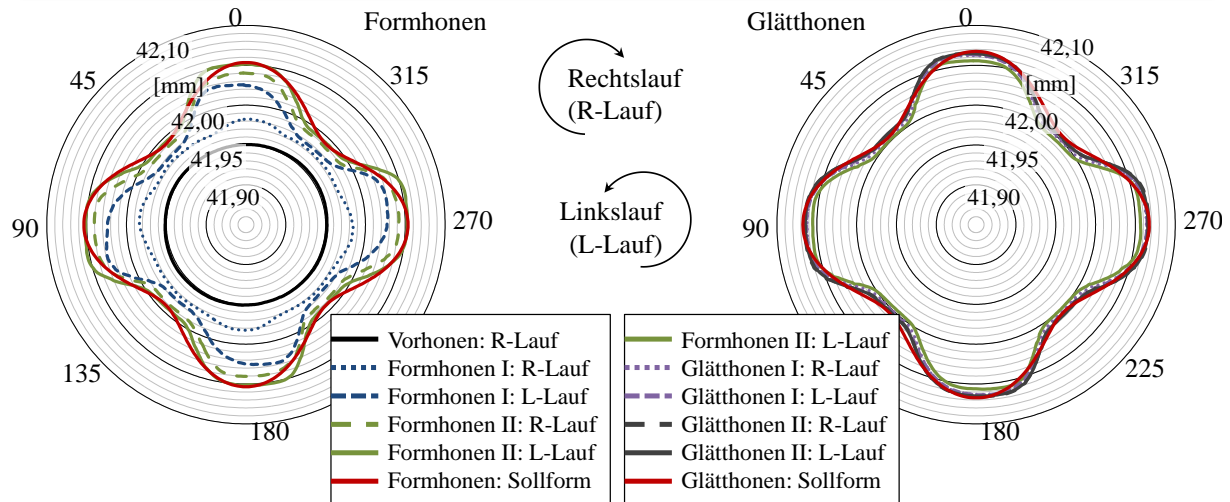


Abbildung 49: Formänderung je Honstufe – Zeitlich äquidistante Skalierung der Steuer- spannungen

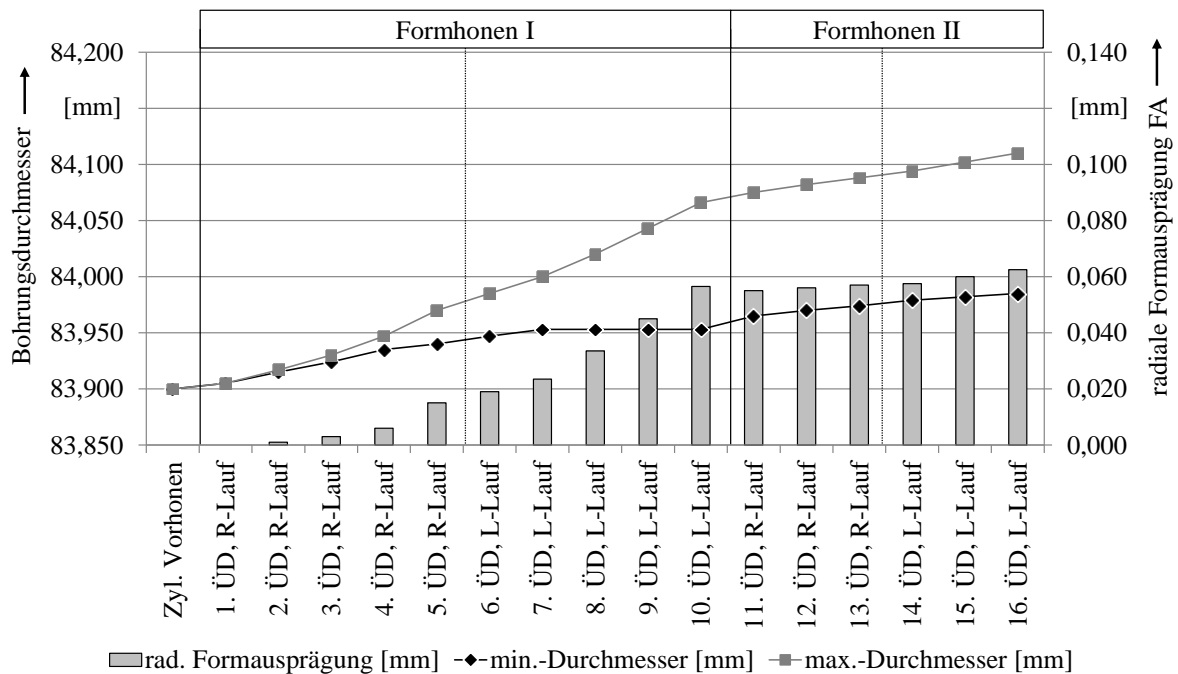


Abbildung 50: Radiale FA je Überdeckung [mm] – Zeitlich äquidistante Skalierung der Steuer- spannungen

Die Betrachtung der radialen Formausprägung (Abbildung 50) für die einzelnen Über- deckungen und Prozessschritte zeigt, dass die Wahl der Skalierungsschrittweite nicht optimal gewählt wurde. Dabei wurde der Hauptanteil der radialen Formausprägung (66,4 %) während

des Linkslaufs der Honspindel im Prozessschritt Formhonen I generiert; insgesamt beträgt die radiale Formausprägung nach 16 vollständigen Überdeckungen 62,5 μm . Gegenüber der Prozessführung ohne zeitliche Skalierung der Ansteuerspannungen wird die Mehrheit des Zerspanvolumens lediglich zeitlich in Richtung Prozessende verlagert; eine gleichmäßige Verteilung der Zerspanmasse über der Honzeit findet nicht statt. Eine Anpassung der Skalierungsschrittweite unter Berücksichtigung der aktorspezifischen Kraft-Weg-Kennlinie bietet hier weiteres Optimierungspotential. Ebenfalls ersichtlich wird dies auch im Ansprechverhalten der Aktorik, da bei gegebener Vorspannung der Formhonleisten mit $p_{AN} = 0,91 \text{ MPa}$ der Schwellwert für eine durch die Aktoren herbeigeführte Formänderung bei ca. 15 % – 20 % der maximalen Steuerspannung liegt. Eine Reduktion der Ansteuerspannung zu Beginn des Prozessschrittes Formhonen II mit dem Hintergrund der Vermeidung von Schichtschädigungen nach dem Drehrichtungswechsel führt bei dieser Prozessauslegung zu sehr geringen Honleistenanpressdrücken. Eine Steigerung der radialen Formausprägung ist erst wieder bei Ansteuerspannungen größer 8 V (80 %) erkennbar. Trotz des vergleichsweise großen Prozesseingriffs während der Formhonoroperationen zeigt sich eine Vergleichbarkeit der während des Glätthonprozesses erzielten Zerspanmasse unabhängig von der Prozessführung in den formgebenden Bearbeitungsschritten, sodass die erzielten Ergebnisse hier nicht mehr gesondert analysiert werden. An dieser Stelle sei lediglich auf die Ergebnisse in Abbildung 49, rechts sowie die Kapitel 5.2.2 und 5.3.2 verwiesen.

5.3.4 Formhonen mit zeitlich faktorieller Skalierung der Steuerspannung

Die nachfolgend diskutierten Formhonergebnisse wurden gemäß Tabelle 8 unter Nutzung faktoriell skalierten Ansteuer matrizen gefertigt. Hiermit soll eine sollformgetreue Bearbeitung mit geringeren Prozesskräften gegenüber der Referenzbohrung (Abbildung 47) ermöglicht werden. Die Betrachtung der Formausprägung je Honstufe (Abbildung 51) zeigt, dass auch hier der Einfluss der Richtungswechsel auf die Zylinderform festgestellt werden kann.

Gegenüber der äquidistanten Skalierung sowie der Referenzvariante (keine zeitliche Skalierung der Ansteuerspannungen) weist diese Zylinderform größere Amplituden von Fourierordnungen ungleich der vierten Harmonischen auf, wodurch die Ausbauchungen und Flankenverläufe breiter ausfallen. Eine äquidistante Skalierung ist daher aus Sicht der formgetreuen Einbringung einer Makrokontur zu bevorzugen.

Der Vergleich der zeitlichen Entwicklung der radialen Formausprägung (Abbildung 52) zeigt kleine Unterschiede zwischen den beiden Skalierungsvarianten. Der Hauptanteil der radialen Formausprägung (73,5 %) wurde bei der faktoriellen Skalierung ebenfalls im Linkslauf des

Prozessschritts Formhonen I generiert; insgesamt beträgt die radiale Formausprägung nach 16 vollständigen Überdeckungen 66,0 μm . Der Anteil des Prozessschritts Formhonen I Rechtslauf an der radialen Formausprägung sinkt zwischen der äquidistanten und faktoriellen Skalierung jedoch von 24 % auf 9,8 %.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	D172
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 12,75 s	Honleisten FH2	D35
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit GL1	2 x 21 s	Honleisten GL1	D30
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit GL2	2 x 21 s	Honleisten GL2	D15
Zeit je Überdeckung	4,25 s	zeitlich faktorielle Skalierung der Ansteuerspannungen			

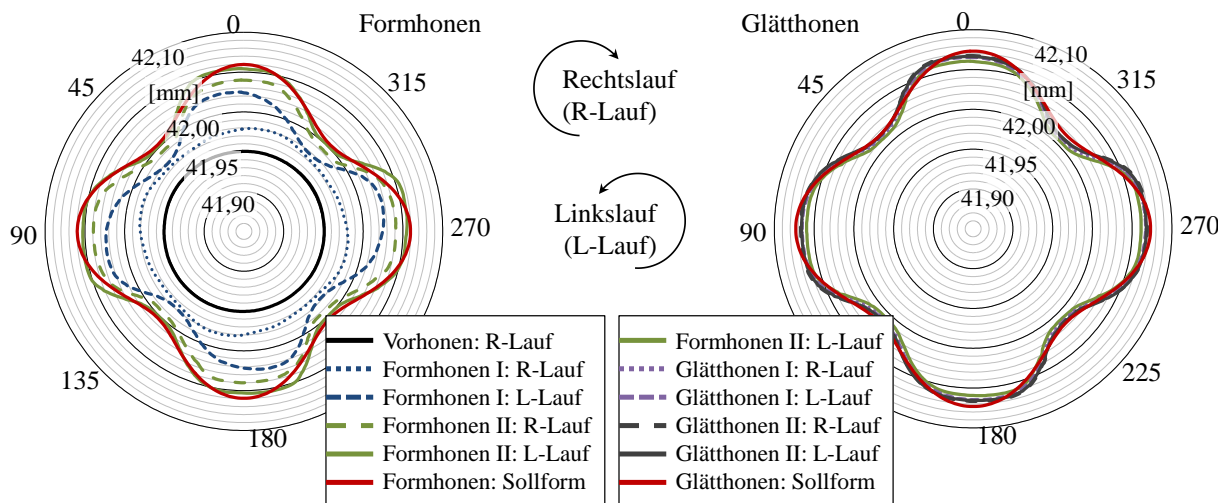


Abbildung 51: Formänderung je Honstufe – Zeitlich faktorielle Skalierung der Steuerspannungen

Um die Fertigung mit gleichmäßigeren Prozesskräften zu fördern sollten in weiterführenden Versuchen honleistenspezifische und optimale Skalierungsschrittweiten für die dargestellten Skalierungsarten untersucht werden. Im Gegensatz zu der hier verwendeten, linearen Verteilung der Skalierungsschrittweite sollten bei der zukünftigen Prozessauslegung (Kapitel 7.3) folgende Randbedingungen berücksichtigt werden: einzuarbeitende Sollform, Übertragungsverhalten der Formhonmaschine und -werkzeug, Kraft-Weg-Kennlinie der Piezoaktorik, Prozessparameter und Schneidmittelspezifikationen. Beispielsweise können aufgrund des höheren Zerspanvolumens großer Schneidkörnungen im Formhonschritt I größere Skalierungsschrittweiten gegenüber den kleinen Korngrößen im Formhonschritt II angesetzt werden.

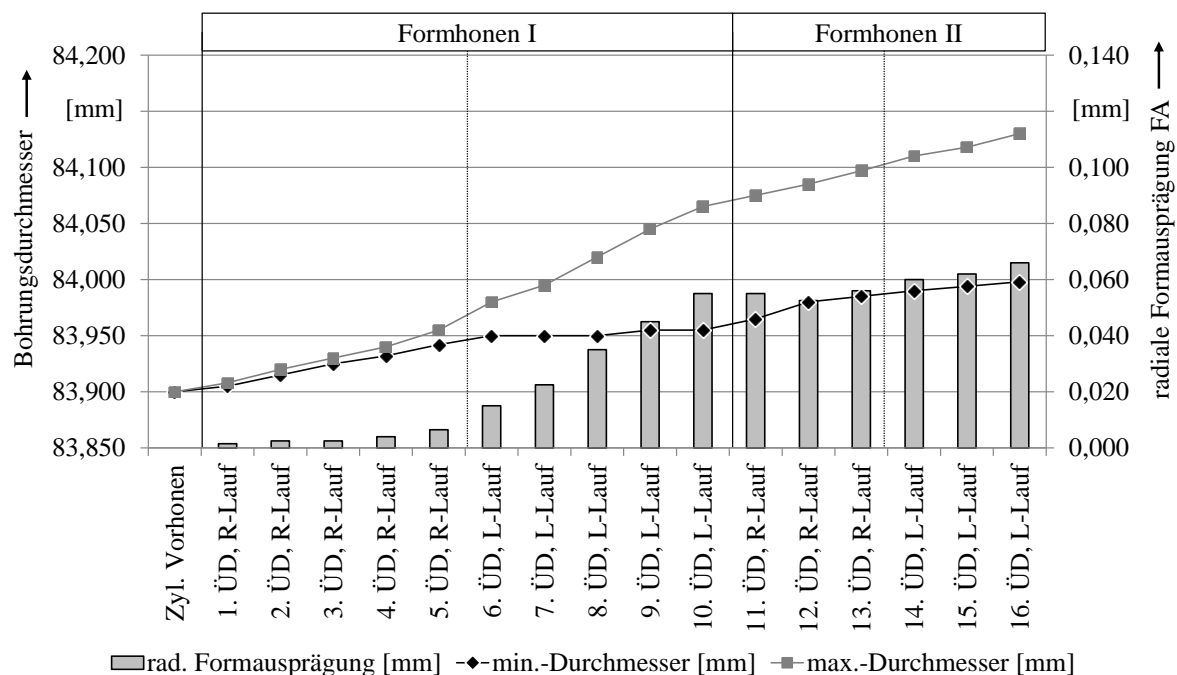
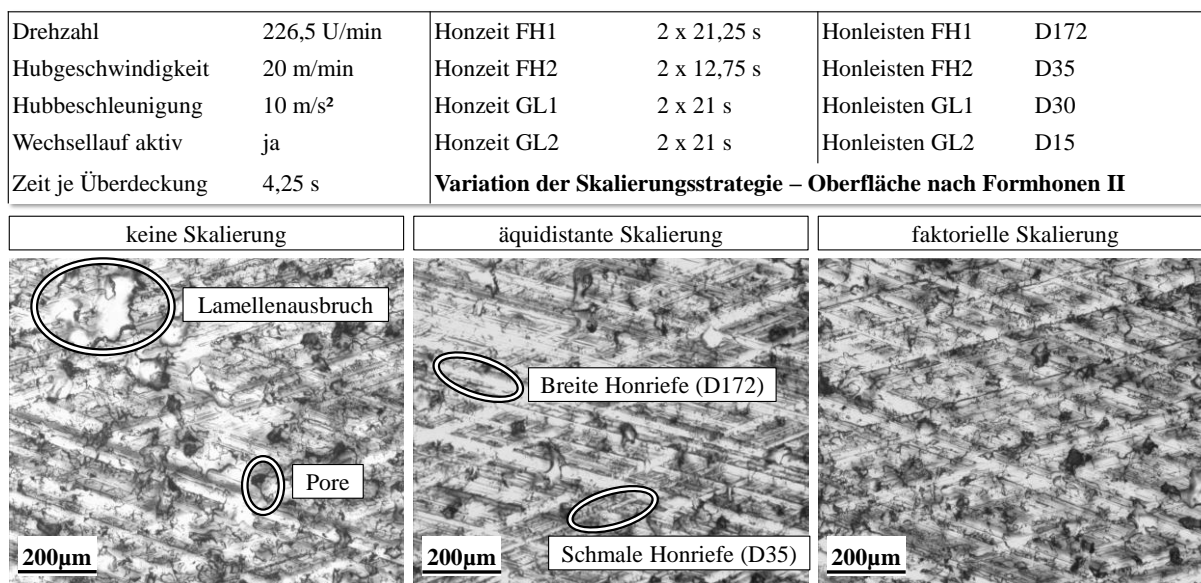


Abbildung 52: Radiale FA je Überdeckung [mm] – Zeitlich faktorielle Skalierung der Spannungen

5.3.5 Auswirkung der Skalierung auf die Oberflächentopographie

Zur Charakterisierung der Laufbahnoberfläche werden von den formgehten, ungeglätteten Oberflächen (keine fertigen Funktionsflächen) Faxbilder erstellt und untersucht. Die Gegenüberstellung der Faxbilder zeigt Abbildung 53.



Bildposition: Zylindermite bei max. Amplitude (0°); Prozessschritt: nach Formhonen II (D35)

Abbildung 53: Variation Skalierungsstrategie der Spannungen – Faxbilder nach Formhonen II

Die Faxfilmaufnahmen der 3 Prozessvarianten sind jeweils der Zylindermitte bei einer Phasenlage von 0° entnommen und zeigen formgehonte Zylinderoberflächen (Bearbeitung mit der Körnung D35) an den Stellen maximaler Formausprägung (maximaler Honleistenanpressdrücke). Bei der Bearbeitung ohne zeitliche Skalierung der Ansteuerspannungen fällt vor allem der Schneidmitteleinfluss des ersten Prozessschrittes auf das Formhonergebnis auf. Die tiefen und breiten Honriefen des D172-Mischkorns (Abbildung 53, Mitte) wirken sich ebenso wie die vorhandenen großen Lamellenausbrüche negativ auf Ölverbrauch und Blow-by aus, sofern diese in dem nachfolgenden Glätthonschritt nicht egalisiert werden. Die Faxfilmaufnahmen der Prozessvarianten mit zeitlicher Skalierung der Ansteuerspannungen zeigen ebenfalls Lamellenausbrüche und breite Honriefen, allerdings ist deren Flächenanteil deutlich geringer verglichen mit der Referenzbohrung.

Die subjektive Beurteilung der Prozessvarianten mittels Faxfilmaufnahmen wird durch die objektive Auswertung der taktilen Rauheitsschriebe bestätigt (Abbildung 54). Dies zeigt sich vor allem in der reduzierten Riefentiefe R_{vk} und dem Ölrückhaltevolumen R_{vv} , da diese Werte für die Referenzbohrung gegenüber denen der Prozessvarianten mit zeitlicher Skalierung der Ansteuerspannungen deutlich erhöht sind. Vermutet werden kann weiterhin, dass die bei der Referenzbohrung auftretenden höheren Prozesskräfte ein tieferes Eindringen der Schneidkörner in die LDS-Schicht ermöglichen und so in einer erhöhten Kernrautiefe R_k gegenüber den anderen Prozessvarianten resultieren (Abbildung 54). Aufgrund der zugrunde liegenden Berechnung des Kennwertes R_{hon} und der damit verbundenen mathematischen „Strukturtrennung“ zeigt sich durch den Einsatz eines einheitlichen Schneidmittels kein Unterschied zwischen den drei genannten Varianten. Bei genauerer Betrachtung kann jedoch festgestellt werden, dass die Rauheitskennwerte an den Stellen minimalen Honleistenanpressdrucks (45°) aufgrund der kleineren Belastung der thermischen Spritzschicht durch die Schneidleisten tendenziell eine geringere Rauheit aufweisen. Die Rauheitsunterschiede zwischen den drei Prozessvarianten an den Bohrungseingstellen (45°) lassen sich trotz gleicher Ansteuerspannung (0 V) dadurch erklären, dass die Honleistenbindung im Referenzprozess aufgrund der höheren Schnittkräfte schneller verschleißt. Die dadurch weiter hervorstehenden und ggf. auch schärferen Schneidkörner dringen so an den Bohrungseingstellen der Referenzbohrung tiefer in die LDS-Schicht ein.

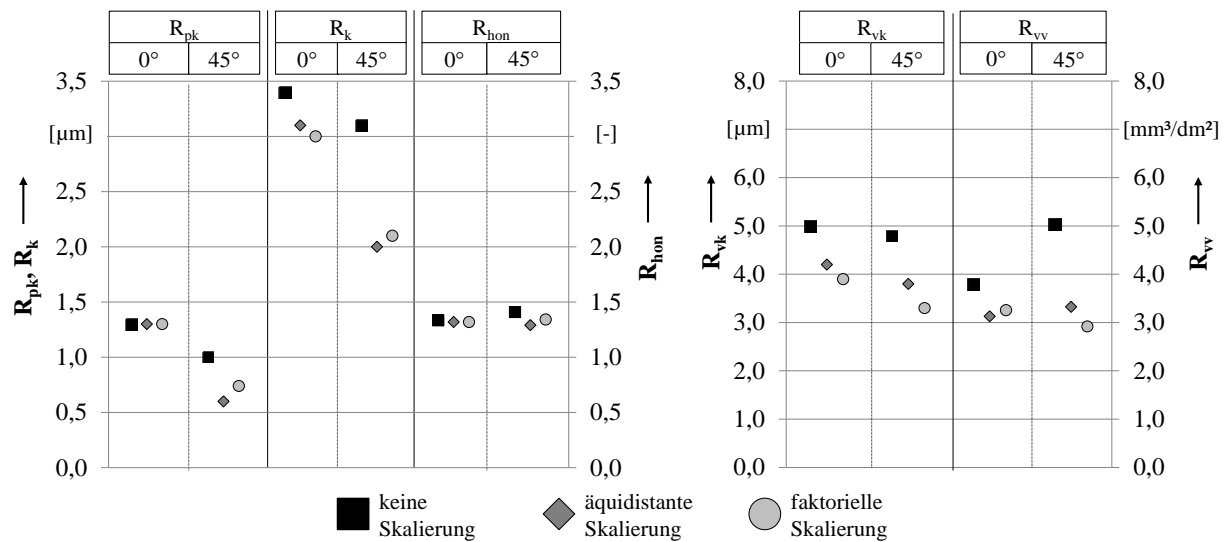


Abbildung 54: Variation Skalierungsstrategie der Steuerspannungen – Rauheit nach Formhonen II

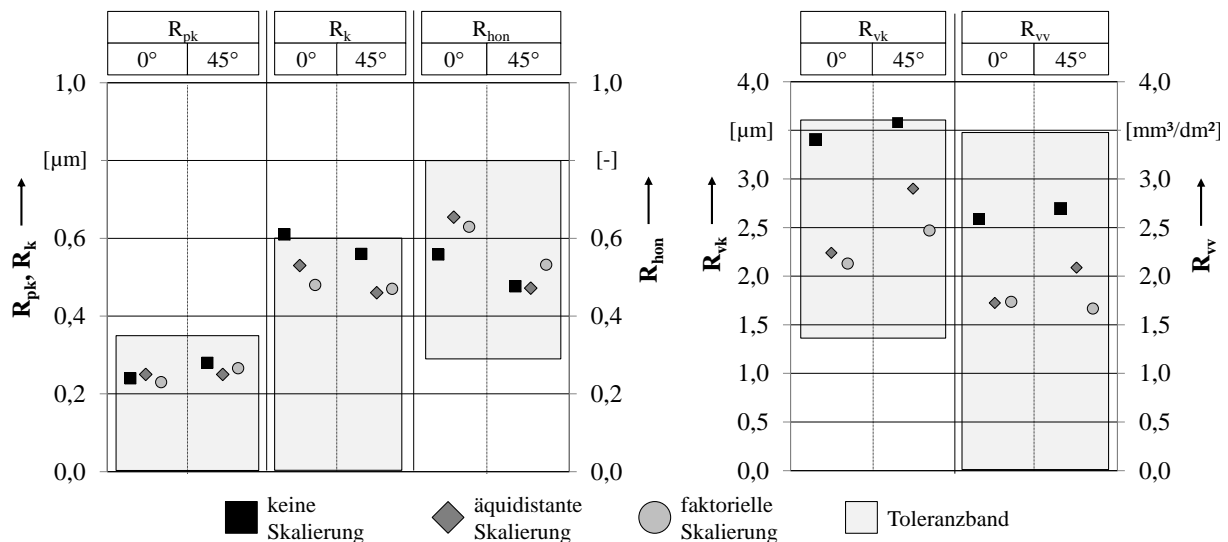


Abbildung 55: Variation Skalierungsstrategie der Steuerspannungen – Rauheit nach Glätthonen II

Im Anschluss an die Formhonzbearbeitung erfolgt entsprechend Tabelle 8 eine zweistufige Glätthonung der Zylinderlaufbahnen. Die Auswertung der entsprechenden Rauheitsschriebe ist in Abbildung 55 dargestellt. Es zeigt sich, dass trotz Glättung der Oberfläche in zwei Arbeitstakten à 42 s deutliche Unterschiede hinsichtlich der finalen Bearbeitungsqualität in Abhängigkeit der vorangegangenen Formhonzung (Schichtschädigungen in Abhängigkeit des lokalen Honleistenanpressdrucks) entstehen. Einerseits zeigen die erfassten Rauheitskennwerte, dass durch die nachlaufende Glätthonbearbeitung die Oberfläche deutlich eingeglättet wird (gesamthafte Reduktion der Oberflächenrauheit). Andererseits wird deutlich, dass das beim Glätthonen generierte Zerspanvolumen nicht ausreicht, um die Rauheit der vorangegangenen Prozessschritte vollständig zu eliminieren. Für die Prozessführung ohne zeitliche Skalierung

der Steuerspannungen befinden sich die gemessenen Rauheiten zudem im oberen Grenzbereich des zulässigen Intervalls.

Die in Abbildung 56 dargestellten Faxbilder der geglätteten Oberflächen unterstützen die zuvor aufgezeigte Argumentationskette. Gegenüber den Varianten mit zeitlicher Skalierung der Ansteuerspannungen weist die Topographie der Referenzbohrung deutlich mehr und größere Ausbrüche aus der LDS-Schicht auf, die das Funktionsverhalten erheblich beeinträchtigen können. Weiterhin fällt auf, dass die Schichtschädigungen an den Stellen maximaler Formausprägung (0°) sichtbar stärker sind, als an den Bohrungsstellen minimalen Honleistenanpressdrucks (45°). Die Oberflächenaufnahmen der beiden Prozessvarianten mit zeitlicher Skalierung der Ansteuer matrizen entsprechen weitestgehend dem Sollzustand. Lediglich wenige Querriefen (Abbildung 56, rechts unten) und vereinzelte, zugeschmierte Poren (Abbildung 56, Mitte unten) können festgestellt werden.

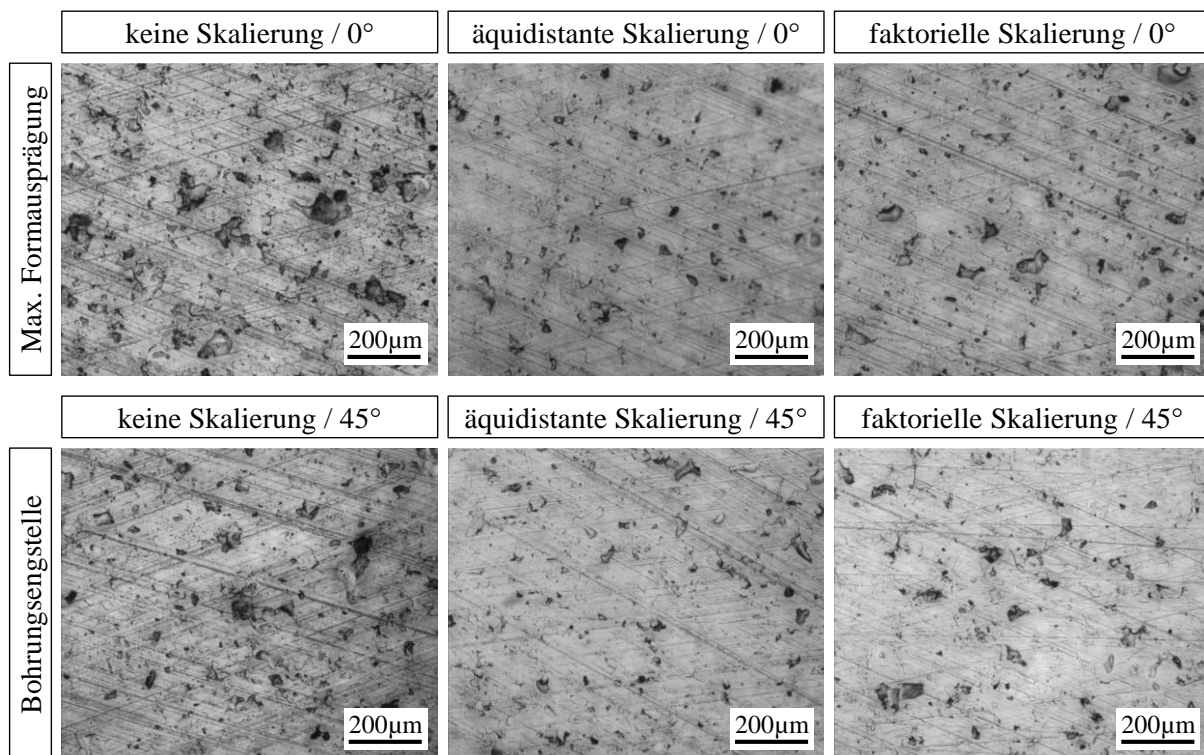


Abbildung 56: Variation Skalierungsstrategie der Steuerspannungen – Faxbilder nach Glätthonen II

5.3.6 Zusammenfassung – Skalieren der Ansteuermatritzen

Es kann festgehalten werden, dass eine Formhonbearbeitung durch die Nutzung zeitlich diskontinuierlich skaliertter Ansteuermatritzen eine Verbesserung der Laufbahnoberfläche erzielt werden kann (Einhaltung der vorgegebenen Rauheitsgrenzwerte). Folgende Erkenntnisse konnten im Rahmen dieses Kapitels zusätzlich gewonnen werden:

Bearbeitung ohne zeitliche Skalierung der Steuerspannungsmatrizen

- Die Formänderungsrate nimmt im Mittel mit jeder vollständigen Überdeckung exponentiell ab.
- Nach den beiden Formhonoperationen weisen die Faxbilder Schichtschädigungen (Lamellenausbrüche) aufgrund der hohen Bearbeitungskräfte zu Prozessbeginn auf

Bearbeitung mit zeitlicher Skalierung der Steuerspannungsmatrizen

- Gegenüber der Bearbeitung ohne zeitliche Skalierung der Steuerspannungsmatrizen zeigen die Faxbilder nach dem Formhonen mit zeitlicher Skalierung der Steuerspannungsmatrizen deutlich weniger Schädigungen der gehonten LDS-Schicht.
- Bei den untersuchten Skalierungsstrategien und Skalierungsschrittweiten sinkt die erzielbare Formausprägung aufgrund der geringeren Kräfte zu Prozessbeginn auf 65 % (äquidistante Skalierung) bzw. 69 % (faktorielle Skalierung).
- Eine Formausprägung kann erst ab einer Initialspannung von ca. 1 V (Ansteuersignal) erzielt werden.
- Gegenüber der Bearbeitung ohne zeitliche Skalierung können mittels der zeitlichen Skalierung der Steuerspannungsmatrizen die Kernrautiefe R_k und die reduzierte Riefentiefe R_{vk} deutlich reduziert werden. Dies ist auf die geringere Anzahl an Schichtschädigungen während des Formhons zurückzuführen.

Um das Ziel einer Halbierung der Bearbeitungszeit beim Glätthonen erreichen zu können (Verbesserung der Prozesswirtschaftlichkeit), bedarf es weiterer prozessoptimierender Maßnahmen, welche in den folgenden Kapiteln diskutiert werden. Diese umfassen neben der Variation des Honleistenanpressdrucks in den vier Prozessschritten (Formhonen I/II; Glätthonen I/II) eine Schneidmittelstudie sowie die Entwicklung einer Echtzeitmessung der Honleistennormalkräfte im Honbetrieb zur Analyse und Optimierung des Honprozesses.

5.4 Optimierung der Richtungswechselfolge und –anzahl der Honspindel

Der in Kapitel 2.3.1 beschriebene Einfluss des Drehrichtungswechsels einer Honspindel auf die Oberflächentopographie [14], soll in diesem Kapitel für das Formhonen von thermischen Spritzschichten verifiziert und minimiert werden. Weiterhin gilt es für die Bearbeitungsschritte Formhonen I und II eine gleichmäßige Bearbeitungszeit je Drehrichtung aus Gründen der Formgenauigkeit zu gewährleisten. Wiens [262] zeigt in diesem Zusammenhang, dass der Einsatz einer Drehrichtungsumkehr maßgeblich zur Verbesserung der Formgüte beiträgt. Zusätzlich zur Honbearbeitung im Wechsellauf trägt der implementierte Korrekturwinkel zur nahezu vollständigen Kompensation der drehrichtungs- und sollformabhängigen Bearbeitungsfehler bei. Die Ursache hierfür liegt jeweils im nichtidealen, mechanischen Übertragungsverhalten des Formhonwerkzeugs. Als weiterer Aspekt bei der Optimierung der Richtungswechselfolge und –anzahl der Honspindel muss der Selbstschärfeffekt der Schneidleisten berücksichtigt werden. Dieser wird durch die Drehrichtungsumkehr begünstigt. Aus den Erkenntnissen zum Einfluss der Spindeldrehrichtung auf das Formhonergebnis kann somit hergeleitet werden, dass aus Gründen der Formgenauigkeit sowie des Selbstschärfeffekts der Schneidleisten eine Bearbeitung im Wechsellauf erforderlich ist. Die Anzahl der Drehrichtungswechsel sollte jedoch aufgrund der negativen Beeinflussung der Oberfläche auf ein Minimum reduziert werden.

Prozess	Ist-Stand																							
Honstufe	Formhonen I: D172					Formhonen II: D35					Glätthonen I: D30				Glätthonen II: D15									
Drehrichtung	Rechts					Links					Rechts				Links		Rechts				Links			
Überdeckung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	21 s		21 s		21 s		21 s	
Honzeit	21,25 s					21,25 s					12,75 s				12,75 s									

Prozess	Prozessführung mit optimierter Richtungswechselfolge und -anzahl																							
Honstufe	Formhonen I: D172					Formhonen II: D35					Glätthonen I: D30				Glätthonen II: D15									
Drehrichtung	Rechts					Links					Links				Rechts		Rechts		Links		Links			
Überdeckung	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	21 s		21 s		42 s			
Honzeit	21,25 s					21,25 s					12,75 s				12,75 s									

Honleistenwechsel

Richtungswechsel

Honzeit je Überdeckung $t_{UD} = 4,25\text{ s}$

geführten faktoriell skalierten Bohrungsvariante verglichen. Diese unterscheiden sich lediglich durch die Richtungswechselfolge und -anzahl. Welchen Einfluss diese Parameteränderung auf die Bohrungsform und deren Topografie hat, kann somit eindeutig bestimmt werden.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	D172
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 12,75 s	Honleisten FH2	D35
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit GL1	2 x 21 s	Honleisten GL1	D30
Wechsellauf aktiv	ja, Variation	Honzeit GL2	2 x 21 s	Honleisten GL2	D15
Zeit je Überdeckung	4,25 s	Zeitlich faktorielle Skalierung der Ansteuerspannungen			

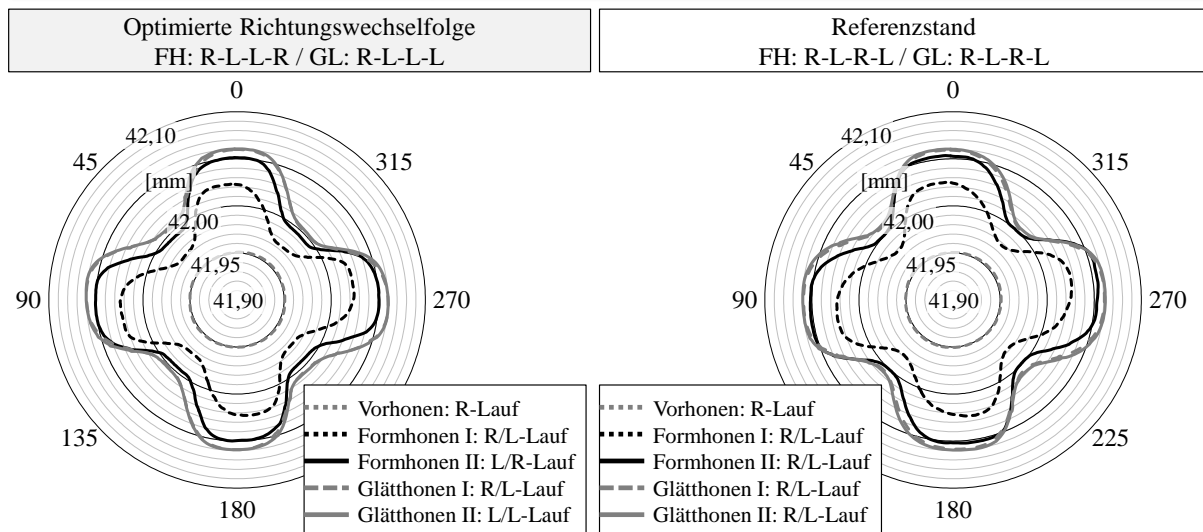


Abbildung 58: Variation Richtungswechselfolge und -anzahl – Formergebnis

Abbildung 58 zeigt die Gegenüberstellung der beiden Bearbeitungsvarianten, wobei die linke Darstellung der optimierten Richtungswechselfolge und -anzahl entspricht. Mit 66,0 μm (Abbildung 58, rechts) bzw. 63,5 μm Formausprägung weisen die beiden betrachteten Varianten eine vergleichbare Amplitude auf. Hinsichtlich der Phasenlage sind bei den beiden Varianten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Lediglich die Breite und Flankenform der Ausbauchungen unterscheiden sich voneinander. Daher zeigt Abbildung 59 einen Vergleich der formgehorten „Kleeblätter“ mit den Harmonischen vierter Fourierordnung der jeweils vorliegenden Amplitude. Es zeigt sich, dass für die vorliegende Prozesskonfiguration die optimierte Richtungswechselfolge und -anzahl keinen Einfluss auf die Formgenauigkeit des Honergebnisses hat. Dies kann dadurch begründet werden, dass durch die Prozessmodifikation keine Qualitätsnachteile im Hinblick auf die geforderte Sollform zu erwarten sind, da die Bearbeitungszeit je Drehrichtung und eingesetztem Schneidmittel konstant gehalten wurde.

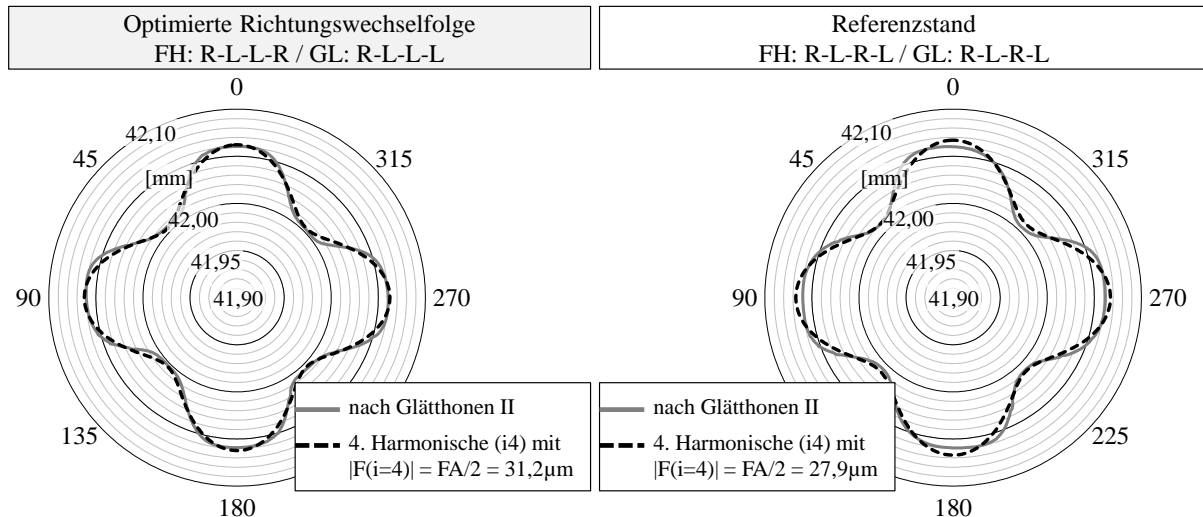


Abbildung 59: Variation Richtungswechselfolge und -anzahl – Beurteilung der Formtreue

Den Einfluss der Reduktion der Richtungswechselfolge und -anzahl auf die finale Oberflächenbeschaffenheit zeigt Abbildung 60. Die messtechnisch ermittelten Rauheitswerte lassen auf eine vergleichbare Plateaubeschaffenheit sowie einen ähnlichen Kernbereich bei beiden Varianten schließen. Die ebenfalls geringen Unterschiede in der reduzierten Riefentiefe R_{vk} deuten zusätzlich auf vergleichbare Porositäten hin. Der leichte Anstieg des R_{vk} -Wertes zwischen 0° und 45° Bohrungsposition kann durch die nicht optimalen Schnittbedingungen an den Stellen minimalen Honleistenanpressdrucks erklärt werden.

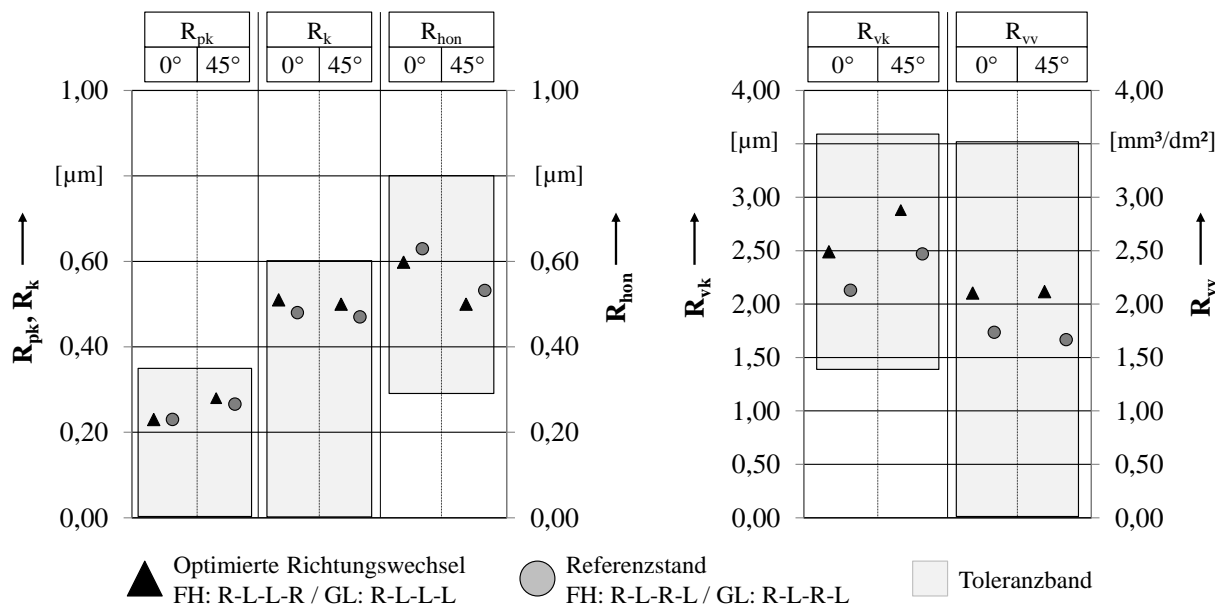


Abbildung 60: Variation Richtungswechselfolge und -anzahl – 2D Rauheitskennwerte – nach Glätthonen II

Die in Abbildung 61 dargestellten Faxbildaufnahmen der beiden Honvarianten bestätigen die Ergebnisse der taktilen Rauheitsschriebe. Die von Böhmer [14] aufgezeigte Topographiemodifikation im Sinne einer Erhöhung der Rauheit bzw. Lamelligkeit kann an dieser Stelle nicht

nachgewiesen werden, da mögliche Unterschiede in der Streubreite der Versuchsreihe liegen. Beide Varianten zeigen ein Honbild, welches den geforderten Qualitätsansprüchen genügt. Unterschiede zwischen den Bohrungsstellen bei 0° und 45° sind ebenfalls schwer erkennbar; es können jedoch vereinzelt Querriefen an den Stellen minimalen Honleistenanpressdrucks lokalisiert werden (Abbildung 61, rechts unten).

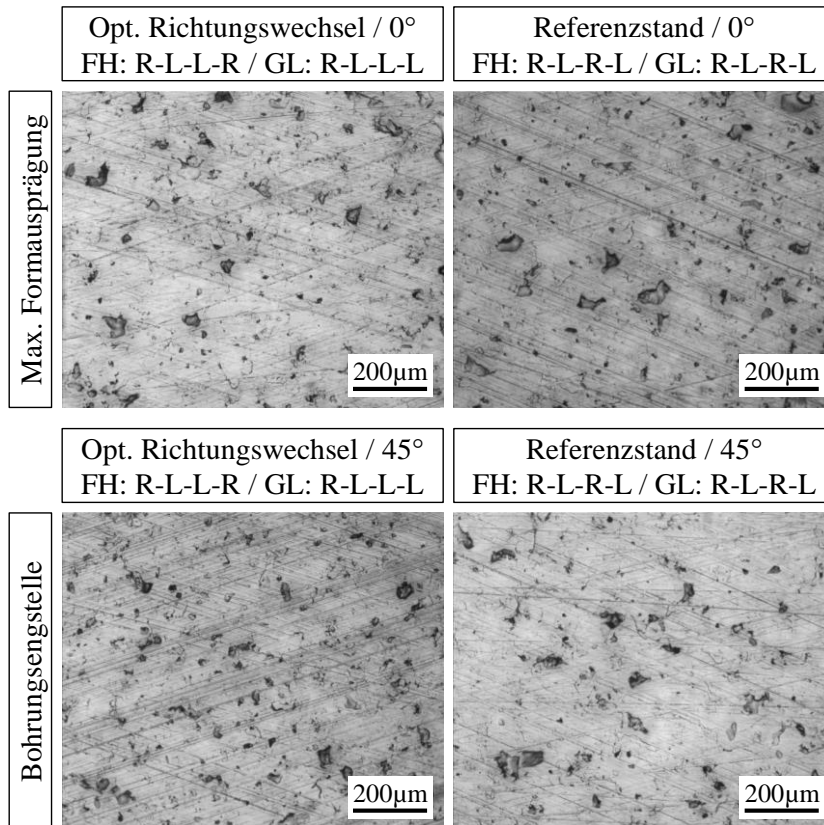


Abbildung 61: Variation Richtungswechselfolge und -anzahl – Faxbildaufnahmen

Zusammenfassung: Optimierung der Richtungswechselfolge und –anzahl

Durch eine Reduktion der Richtungswechsel kann keine Verbesserung der Formgenauigkeit und Rautiefe nachgewiesen werden. Die Analyse der gehonten Oberflächen zeigt zudem, dass für die eingesetzten Schneidmittel der Selbstschärfeeffekt bei geänderter Richtungswechselfolge und -anzahl gewährleistet wird. Trotz fehlenden Einflusses auf die Rautiefe findet die optimierte Richtungswechselfolge und –anzahl bei den folgenden Versuchen Anwendung, da durch weniger Drehrichtungswechsel der Spindel die Taktnebenzeiten verkürzt werden. (Erklärung: Ein Drehrichtungswechsel der Spindel erfordert ein Ausfahren und Einfahren der Spindel in die Bohrung.)

5.5 Variation des Zerspanvolumens an der Bohrungseingstelle

5.5.1 Versuchsbeschreibung

Nachfolgende Versuchsreihen (Kapitel 5.5 bis Kapitel 8) erfolgen anhand einer vordefinierten Makroform, dargestellt in Abbildung 62. Diese Sollform setzt sich aus einer Überlagerung der 0. und 4. Fourierordnung zusammen. Die Form der 4. Fourierordnung (Kleeblatt) mit einer maximalen radialen Ausprägung von $55\text{ }\mu\text{m}$ bei 0° Bohrungsposition (Vorgabeebene 2: $22,86\text{ mm}$) und einem Zerspanvolumen von 1200 mm^3 wurde gewählt um die dynamischen Anforderungen von Verschraubungsverzügen zu simulieren. Die maximale Formausprägung des Kleeblatts sowie die konische Aufweitung der Bohrungseingstelle (bei 45° Bohrungsposition) ab Vorgabeebene 3 ($40,71\text{ mm}$ Bohrungstiefe) simulieren das Formvolumen und den axialen Gradienten thermischer Zylinderdeformationen. Bei den formgehohten Geometrien handelt es sich jedoch nicht um reale Antiverzugskonturen. Vielmehr sind die hier gewählten Formen so ausgewählt, dass die Soll- von der Istkontur messtechnisch mit hoher Ortsauflösung unterschieden werden kann.

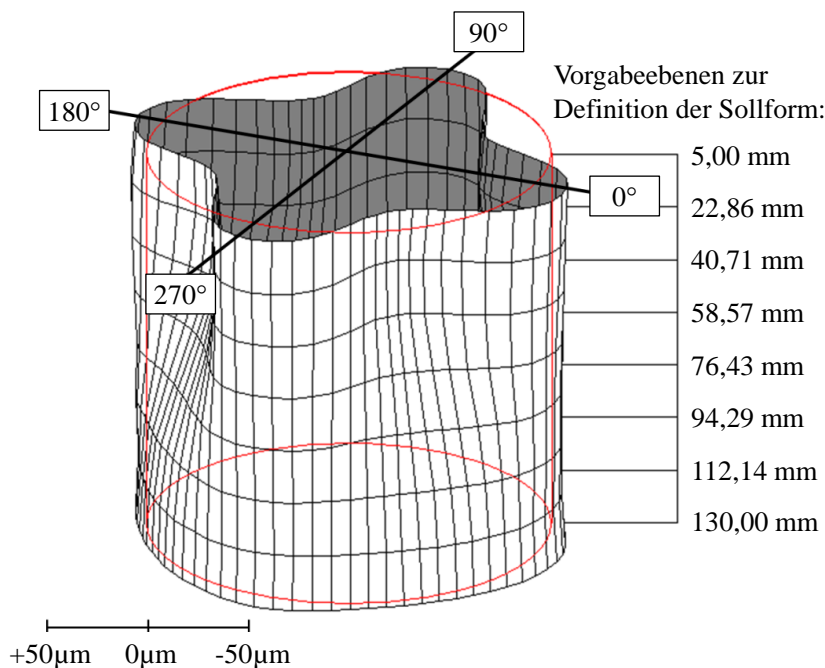


Abbildung 62: Schematische Darstellung der neuen Sollform [242]

In diesem Versuch soll der Honprozess um einen Arbeitstakt Glätthonen gekürzt werden, wodurch sich die zur Verfügung stehende Gesamthonzeit von $t_{h_alt} = 4 \times 45\text{ s}$ auf $t_{h_neu} = 3 \times 45\text{ s}$ reduziert. Weiterhin soll durch geeignete Optimierungsmaßnahmen die Oberflächengüte an den Bohrungseingstellen entsprechend der in Kapitel 4.4.2 genannten Grenzwerte verbessert werden. Als Versuchsziel soll durch die Variation des Anlegewertes (Zu-

stellendrucks) das Zerspanvolumen an der Bohrungseingestelle variiert und somit die Oberflächentopographie beeinflusst werden.

Während des ersten Formhonschritts erfolgt die Bearbeitung mit dem größten mittleren Korndurchmesser. Da die in diesem Schritt erzielte Rauheit als konstanter Ausgangszustand angesehen werden kann, wird lediglich der Anlegewert für die zweite Formhonstufe variiert. Durch Beurteilung der erzielten Oberflächenstrukturen kann das minimal notwendige Zerspanvolumen an der Bohrungseingestelle zur Erreichung der geforderten Oberflächenkennwerte bestimmt werden. Die Versuchsreihe berücksichtigt dabei, dass dieses Mindestzerspanvolumen über der gesamten Bohrung wirksam ist und somit auch die Topographie an den Stellen maximaler Formausprägung beeinflusst. Eine Auswertung der beiden Grenzbereiche (Bohrungseingestelle und Stelle max. Formausprägung) ist daher zwingend erforderlich.

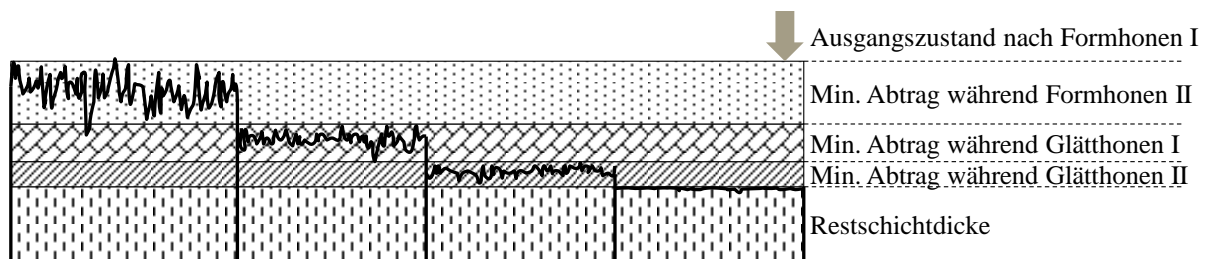


Abbildung 63: Schematische Darstellung der raueitsbedingten Mindest-Zerspanmasse je Honstufe

Die Erfassung der Anlegekraft F_{AN} erfolgt dabei über einen oberhalb der piezoelektrischen Zustelleinheit integrierten Kraftmesssensor. Dieser Sensor misst eine axiale Kraftkomponente der durch die „Grobzustellung“ (Kapitel 4.2.1) verursachten Honleistenzustellung. Unter Vernachlässigung der mechanischen Reibungsverluste kann der durch den Anlegewert definierte Honleistenanpressdruck mathematisch ermittelt werden. Als Referenzwert wurde eine Anlegekraft des gemeinsamen Honleistenvorschubs von 600 N definiert, welcher die Federkraft der Rückholfedern (radiale Umlauffeder) beinhaltet. Die Federkraft der radialen Umlauffedern beträgt $F_{FR} \approx 350$ N. Bei vier eingesetzten Formhonleisten und einem Konuswinkel γ von 40° beträgt der durch den Anlegewert hervorgerufene mathematische Honleistenanpressdruck p_{AN} für die Referenzbohrung 0,91 MPa. Ausgehend von diesem Anlegedruck erfolgt zur definierten Variation der Anlegekraft eine diametrale Leistenzustellung von $-90\ \mu\text{m}$, $-60\ \mu\text{m}$, $-30\ \mu\text{m}$, $+30\ \mu\text{m}$, $+60\ \mu\text{m}$ und $+90\ \mu\text{m}$. Die verwendeten Versuchsparmeter können Tabelle 9 entnommen werden.

Tabelle 9: Versuchsplan – Variation des Zerspanvolumens an der Bohrungsengstelle

Bearbeitungsparameter Formhonen I & II (FH 1 / FH II)			
Maschinenparameter, Schneidmittel und Kühlschmierstoff nach Tabelle 7			
Zeitliche, äquidistante Skalierung der Ansteuermatrizen je Überdeckung ($t_{UD} = 4,25 \text{ s}$)			
FH 1 - Rechtslauf		FH 1 - Linkslauf	
Erster Maschinentakt		Zweiter Maschinentakt	
1) $\Delta y = 0,50 \times y_m$	6) $\Delta y = 0,30 \times y_m$	11) $\Delta y = 0,09 \times y_m$	16) $\Delta y = 0,04 \times y_m$
2) $\Delta y = 0,45 \times y_m$	7) $\Delta y = 0,25 \times y_m$	12) $\Delta y = 0,08 \times y_m$	17) $\Delta y = 0,03 \times y_m$
3) $\Delta y = 0,40 \times y_m$	8) $\Delta y = 0,20 \times y_m$	13) $\Delta y = 0,07 \times y_m$	18) $\Delta y = 0,02 \times y_m$
4) $\Delta y = 0,35 \times y_m$	9) $\Delta y = 0,15 \times y_m$	14) $\Delta y = 0,06 \times y_m$	19) $\Delta y = 0,01 \times y_m$
5) $\Delta y = 0,30 \times y_m$	10) $\Delta y = 0,10 \times y_m$	15) $\Delta y = 0,05 \times y_m$	20) $\Delta y = 0,00 \times y_m$
Variation des Anpressdrucks durch den Anlegewert zu Bearbeitungsbeginn			
Leistenart	Formhonen I	Formhonen II	
Formhonleisten	keine Variation	V1: Ref – 90 μm : $p_{AN} = 0$ (keine Anlage an Bohrungswand) V2: Ref – 60 μm : $p_{AN} = 0,04 \text{ MPa}$ V3: Ref – 30 μm : $p_{AN} = 0,31 \text{ MPa}$ Ref: $p_{AN} = 0,91 \text{ MPa}$ V4: Ref + 30 μm : $p_{AN} = 1,72 \text{ MPa}$ V5: Ref + 60 μm : $p_{AN} = 2,66 \text{ MPa}$ V6: Ref + 90 μm : $p_{AN} = 3,73 \text{ MPa}$	
Hartmetall-Stützleisten	1000 N inkl. $F_{RF} = 350 \text{ N}$; $p_{AN_St} = 0,40 \text{ MPa}$ mit Konuswinkel $Y = 22,5^\circ$ und Stützleistenfläche = $80 \times 6 \text{ mm}^2$		
Bearbeitungsparameter Glätthonen I & II (GL 1 / GL II)			
Maschinen- & Bearbeitungsparameter, Schneidmittel und Kühlschmierstoff nach Tabelle 7			
Dritter Maschinentakt			
GL 1 - Rechtslauf		GL 1 - Linkslauf	
GL 2 - Linkslauf			
$t_h = 10,5 \text{ s}$	$t_h = 10,5 \text{ s}$	$t_h = 21 \text{ s}$	

5.5.2 Formhonergebnisse bei der Variation des Verlustaufmaßes

Zur Verbesserung des Schneidverhaltens an der Bohrungseingestelle (siehe Abbildung 62) soll in dieser Versuchsreihe der Einfluss des minimalen Honleistenanpressdrucks auf das Formhonergebnis untersucht werden. Die Auswirkungen einer Modifikation des Anlegewertes auf die radiale Formausprägung sowie den minimalen homogenen Zerspanweg (Verlустаufmaß) zeigt Abbildung 64.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	D172
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 21,25 s	Honleisten FH2	D35
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit GL1	2 x 10,5 s	Honleisten GL1	D30
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit GL2	2 x 10,5 s	Honleisten GL2	D15
Variation des Anlegedrucks der Formhonleiste an der Bohrungswand ausgehend vom Referenz (Ist)-Stand					

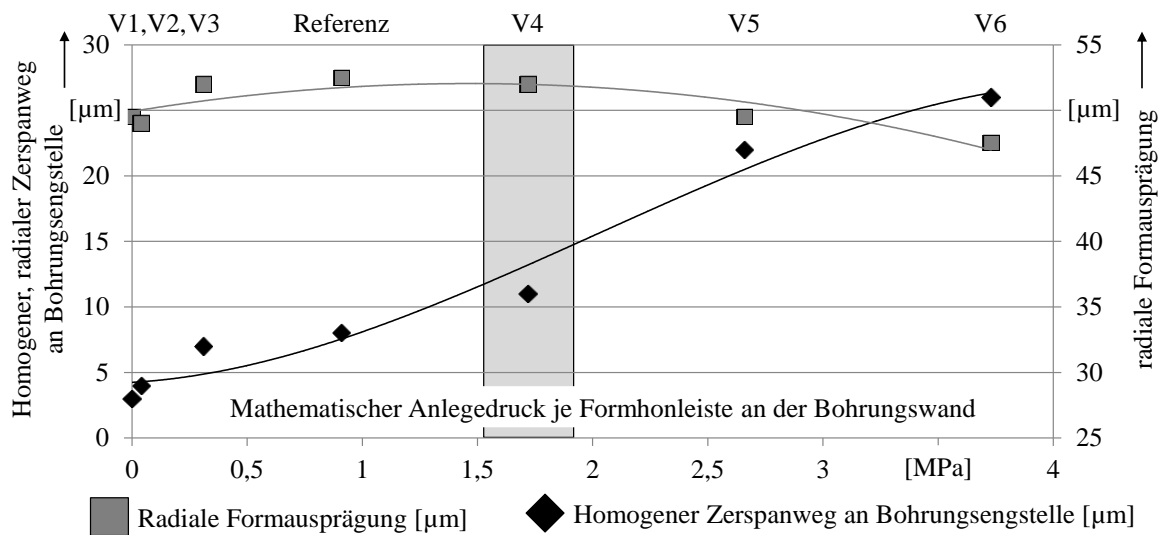


Abbildung 64: Auswirkung des Anlegedrucks auf Formausprägung und homogenen Zerspanweg

Bei einer lokalen Ansteuerspannung von 0 V entspricht der Anlegewert dem minimalen Honleistenanpressdruck zu Prozessbeginn. Die Einstellung der Anlegekraft F_{AN} erfolgt dabei über einen oberhalb der piezoelektrischen Zustelleinheit integrierten Kraftmesssensor in Kombination mit der durch die „Grobzustellung“ verursachten Honleistenzustellung. Es zeigt sich, dass mit steigendem Anpressdruck die homogene, radiale Materialzerspannung an der Bohrungseingestelle (Abbildung 62, 45° Bohrungspostion) steigt. Weiterhin wird deutlich, dass es hinsichtlich der radialen Formausprägung einen optimalen Anlegewert an der Bohrungswand gibt, welcher nach Analyse der Versuchsdaten bei ca. 0,3 MPa bis 1,8 MPa je Formhonleiste liegt. Der bogenförmige Verlauf der Kurve mit dem zuvor genannten lokalen Maximum kann durch die Überlagerung der wirkenden Kräfte sowie den genutzten Arbeitsbereich der Piezoaktoren erklärt werden (Abbildung 65).

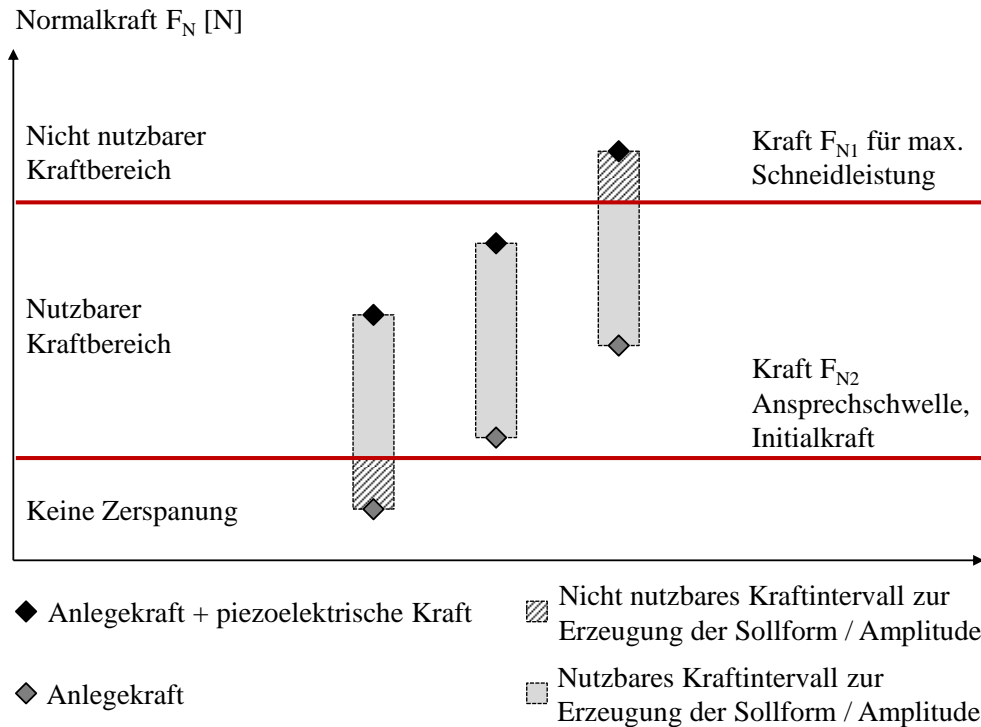


Abbildung 65: Prinzipskizze – Nutzbares Kraftintervall zur Erzeugung der Sollform

Zur Materialzerspanung ohne aktive Ansteuerung der Aktorik (Feinzustellung) muss demnach eine minimal notwendige Kraft über die Grobzustellung aufgebracht werden [100]. Wird dieser Schwellwert weiter erhöht und von den durch die Piezoaktoren verursachten Kräften überlagert, so wächst die maximal erzielbare Formausprägung aufgrund des verbesserten Schneidverhaltens der Honleisten. Übersteigen die resultierenden Honkräfte als Summe der Einzelkräfte aus Grob- und Feinzustellung ein bislang nicht bekanntes, absolutes Kraftniveau, so findet keine weitere Erhöhung des lokalen Zerspanvolumens statt [65]. Die maximale Schneidleistung der eingesetzten Honleiste wird somit überschritten. Dadurch sinken das Kraftdelta aus nutzbarer Maximal- und realer Minimalkraft und damit verbunden auch die erzielbare Formausprägung.

Mit einer nahezu Verdopplung des Anlegedrucks p_{AN} von 0,91 MPa auf 1,72 MPa kann zudem ohne signifikante Änderung der Bohrungsform der homogene, radiale Zerspanweg an der Bohrungsengstelle um ca. 50 % gesteigert werden. Abbildung 66 zeigt diese durchmesserbereinigten Geometrieänderungen abhängig von der verwendeten Anlegekraft zu Prozessbeginn. Es zeigt sich, dass die größten Abweichungen von der Referenzform bei max. Amplitude bzw. an den Bohrungsengstellen auftreten. Dies ist auf das zuvor beschriebene Verhalten aus lokaler Anlegekraft und resultierendem Zerspanvolumen zurückzuführen. Aus Sicht der Formtreue bei gleichzeitiger Anhebung der homogenen Zerspannung an der Bohrungsengstelle ist eine Erhöhung des Anlegewertes auf ca. 1,7 MPa (V4) zu empfehlen. Diese Maßnahme

gilt es im Weiteren aus Sicht der daraus hervorgehenden Oberflächentopographie zu überprüfen (Abbildung 67).

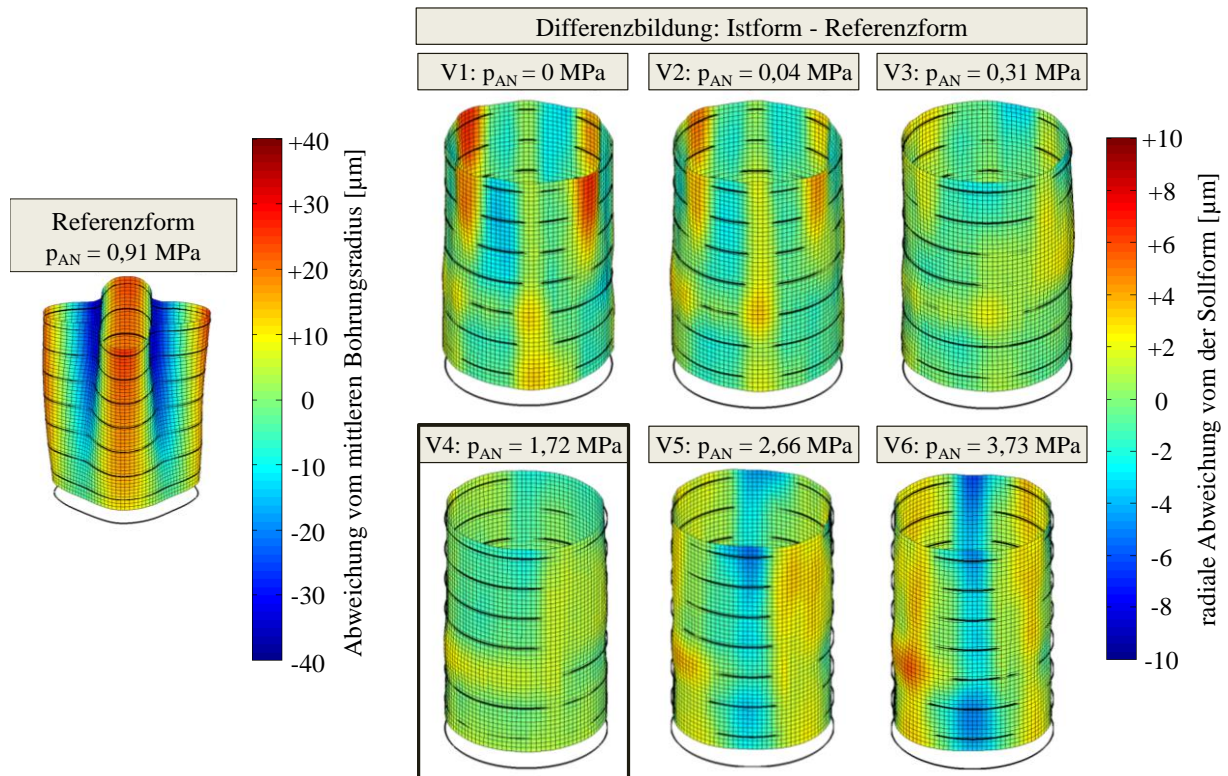


Abbildung 66: Variation Verlustaufmaß – Auswirkungen des Anlegewertes auf die Bohrungsform

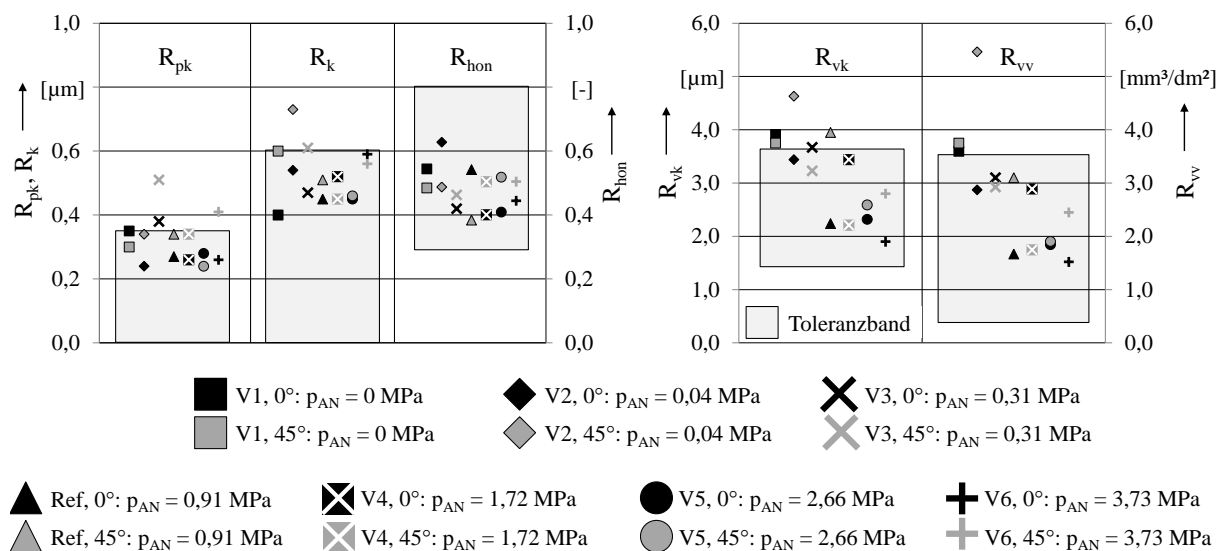


Abbildung 67: Variation Verlustaufmaß – taktile 2D-Rauheitskennwerte

Die Oberflächen der Versuchproben V4 ($p_{AN} = 1,72$ MPa) und V5 ($p_{AN} = 2,66$ MPa) weisen als einzige Rauheiten im zulässigen Toleranzbereich auf (Abbildung 67). Gleichzeitig werden die Auswirkungen des eingesparten Glätthontaktes auf die Oberflächenqualität sichtbar. Ver-

glichen mit dem Ist-Stand zeigt die gewählte Prozessmodifikation mit zeitlich äquidistanter Skalierung der Ansteuerspannungen, optimierter Richtungswechselfolge und –anzahl sowie einer Anpassung des minimalen Anpressdrucks zur Verbesserung der Oberflächengüte an den Bohrungseingängen für die Varianten V4 und V5 vergleichbare, grenzwertige Rauheiten. Durch die Optimierungsmaßnahmen ist die angestrebte Halbierung der Glätthzeit (Taktzeitreduktion) unter Einhaltung der Rauheitstoleranzen möglich. Darüber hinaus können die Rauheiten jedoch nicht verbessert werden.

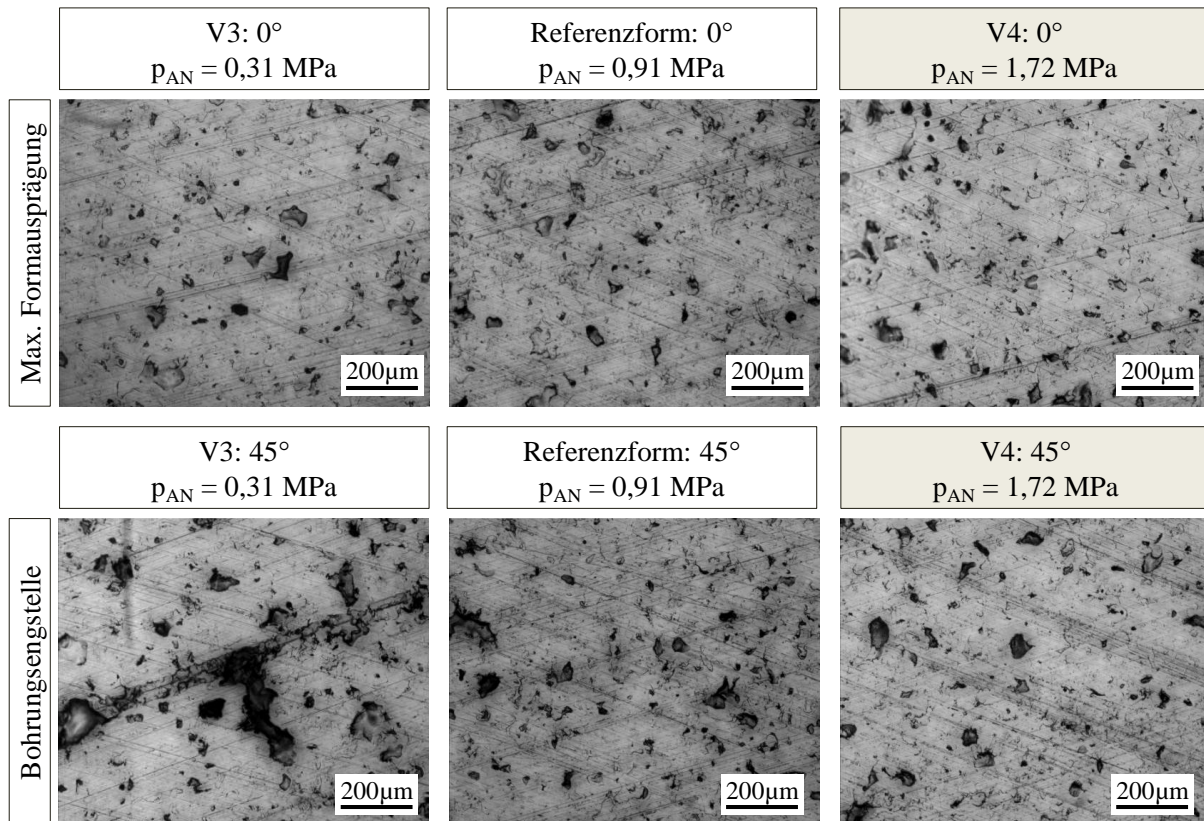


Abbildung 68: Variation Verlustaufmaß - Faxbildaufnahmen

Zur Verifizierung der bisherigen Untersuchungsergebnisse können die Faxfilmaufnahmen aus Abbildung 68 herangezogen werden. Zur Verdeutlichung des Einflusses des Anlegewertes auf die gehonte Oberfläche werden der Referenz ($p_{AN} = 0,91 \text{ MPa}$) die Varianten V4 ($p_{AN} = 1,72 \text{ MPa}$) und V3 ($p_{AN} = 0,31 \text{ MPa}$) gegenübergestellt. Die Aufnahmen der Oberfläche der Referenzbohrung zeigen die Folgen der Reduktion der Glätthzeit. Neben einzelnen, zugeschmierten Poren sowie Schichtausbrüchen sind an den Bohrungseingängen (45°) mangels ausreichender Zerspanung noch Bearbeitungsspuren vorangegangener Honprozesse erkennbar. Durch Verdopplung des minimalen Anpressdrucks an den Bohrungseingängen (V4) und den damit verbundenen Anstieg des homogenen Zerspanwegs bei 45° Bohrungsposition wird die Ausgangsrauheit vollständig egalisiert. Durch die feine D15-Körnung wird im zwei-

ten Glätthonschritt eine vergleichbare Plateaurauheit bei allen Varianten hergestellt (R_{pk} -Wert), das Beseitigen von Fehlstellen ist aufgrund der geringen Zerspanleistung der Korngröße nicht gegeben.

Durch die beschriebene Reduktion des Honleistenanpressdrucks an den Bohrungseingstellen bei Variante 3 können die jeweiligen Ausgangsrauheiten nicht vollständig zerspannt werden und es bleiben große Lunker / Ausbrüche und breite sowie tiefe Bearbeitungsriefen bestehen, welche das Funktionsverhalten des gehonten Kurbelgehäuses nachteilig beeinflussen. An den Stellen maximaler Formausprägung (0°) sind zwischen den Varianten V3, Referenz und V4 keine signifikanten Unterschiede ersichtlich.

Zusammenfassung – Variation des Zerspanvolumens an der Bohrungseingstelle

Folgende Erkenntnisse konnten im Rahmen dieses Kapitels gewonnen werden:

- Mit zunehmendem Anpressdruck steigt die homogene, radiale Materialzerspannung an der Bohrungseingstelle
- Bezogen auf die maximal erzielbare radiale Formausprägung existiert ein optimaler Anlegewert an der Bohrungswand. Dieser liegt im Intervall von 0,3 MPa bis 1,8 MPa je Formhonleiste.
- Die Zylinderform wird nicht maßgeblich durch eine Veränderung des Anpressdrucks an den Bohrungseingstellen beeinflusst.
- Bei gleichzeitiger Nutzung von zeitlich skalierten Ansteuerspannungen führt eine Erhöhung des Anpressdrucks an den Bohrungseingstellen auf ca. 1,6 MPa bis 1,8 MPa zu einer Verbesserung der erzielbaren Oberflächenqualität.
- Eine Erhöhung des Anpressdrucks an den Bohrungseingstellen auf 1,7 MPa ist aus Sicht der Zylinderform und Oberflächentopographie zu empfehlen.

In nachfolgenden Versuchen muss jedoch der Einfluss dieser Maßnahme auf den resultierenden Honleistenverschleiß untersucht werden, da durch eine Erhöhung der Bearbeitungskräfte das Risiko von zunehmendem Honleistenverschleiß besteht. Diese Untersuchungen erfolgen in Kapitel 6.2 sowie unter Berücksichtigung aller Optimierungsmaßnahmen in Kapitel 8.

5.6 Variation Anpressdruck beim Glätthonen

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung der Oberflächengüte formgehoher Zylinderlaufbahnen bietet die Anpassung der Federhärte D zur Änderung des Honleistenanpressdrucks beim Glätthonen. Dadurch soll das Zerspanvolumen während des zweistufigen Finishprozesses so variiert werden, dass an der Bohrungseingestelle zur Erreichung der geforderten Oberflächengüte eine Mindestzerspanmasse erzielt wird. Hierzu wird die Drahtstärke der beiden unter den Glätthonleisten befindlichen Federelemente verändert (Abbildung 28). Durch eine definierte Anlage der Glätthonleisten zu Prozessbeginn ist es möglich auf Basis der Federrate D einen nominellen Anpressdruck zu ermitteln. Dabei wird zunächst der volle Einfederweg der Glätthonsegmente ausgenutzt, sodass diese gegen die Zylinderlaufbahn blockiert werden. Anschließend erfolgt eine radiale Rücknahme des Anlegewertes von $1000\text{ }\mu\text{m}$. Der daraus resultierende Wert sichert ein reproduzierbares Anlegen der Glätthonleisten zu Prozessbeginn unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Honleistenverschleißes. Die Honbearbeitung erfolgt entsprechend Tabelle 9, Variante „Ref“, bei welcher eine Variation der Federhärte vorgenommen wird. Die eingesetzten Federhärten sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Eingesetzte Federhärten bei der Glätthonbearbeitung

Variation Federhärte beim Glätthonen		
Variante	Glätthonen I	Glätthonen II
Referenz: mittel – mittel	Federhärte $D = 11,9\text{ N/mm}$	Federhärte $D = 11,9\text{ N/mm}$
V1: weich – weich	Federhärte $D = 4,6\text{ N/mm}$	Federhärte $D = 4,6\text{ N/mm}$
V2: hart – hart	Federhärte $D = 26,1\text{ N/mm}$	Federhärte $D = 26,1\text{ N/mm}$
V3: hart - mittel	Federhärte $D = 26,1\text{ N/mm}$	Federhärte $D = 11,9\text{ N/mm}$

Für die untersuchten Federn wurden, basierend auf einer Leistenfläche von 80 mm^2 bei 2 Federn je Honleiste, folgende aus der Prozesseinrichtung resultierende Honleistenanpressdrücke ermittelt:

- Weicher Federsatz ($D_w = 4,559\text{ N/mm}$): $p_{AN_w} = 0,378\text{ MPa}$ ($F_{max} = 19,69\text{ N}$)
- Referenz-Federsatz ($D_r = 11,855\text{ N/mm}$): $p_{AN_r} = 0,621\text{ MPa}$ ($F_{max} = 36,69\text{ N}$)
- Harter Federsatz ($D_h = 26,048\text{ N/mm}$): $p_{AN_h} = 0,870\text{ MPa}$ ($F_{max} = 60,85\text{ N}$)

Bearbeitungsparameter Glätthonen

Drehzahl	160 U/min	Honzeit GL1	2 x 10,5 s	Honleisten GL1	D30
Hubgeschwindigkeit	15 m/min	Honzeit GL2	2 x 10,5 s	Honleisten GL2	D15
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Wechsellauf aktiv	ja	Anmerkung: V = Variante	

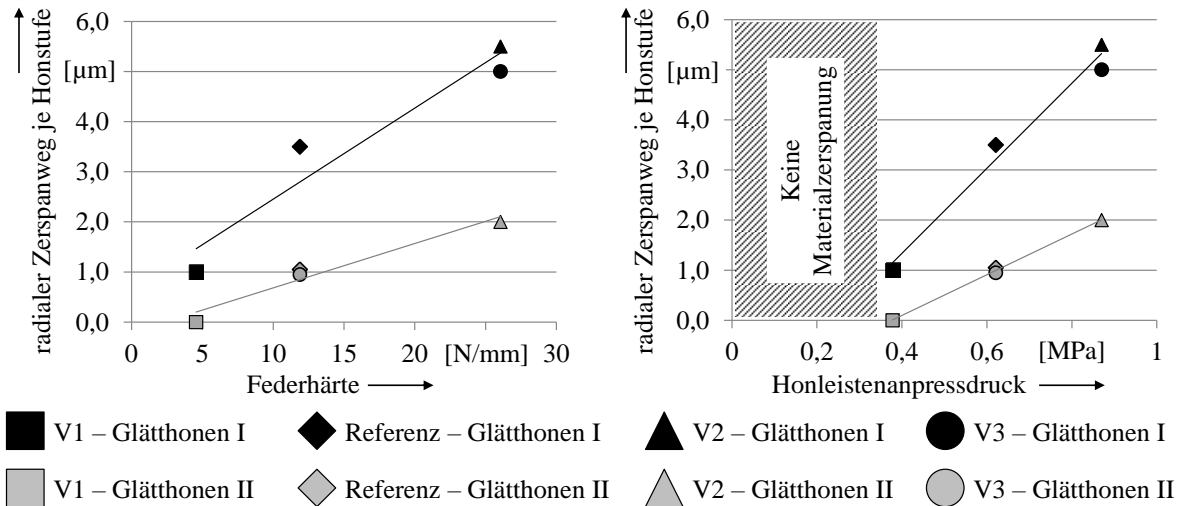


Abbildung 69: Variation Federhärte – radialer Zerspanweg je Honstufe

Der jeweilige erzielte radiale Zerspanweg je Glätthonstufe ist in Abbildung 69 festgehalten. Dabei ist der radiale Zerspanweg über der Federhärte (links) sowie dem nominellen Honleistenanpressdruck (rechts) aufgetragen. Es zeigt sich näherungsweise eine Proportionalität zwischen dem Anstieg der Federhärte D und dem steigenden Honleistenanpressdruck p_{AN} . Abweichungen vom Idealverlauf sind auf den differierenden Einfederweg der verwendeten Federelemente zu Prozessbeginn zurückzuführen. Diese Einfederwege sind wiederum in den unterschiedlichen Drahtstärken begründet. Abbildung 69 zeigt weiterhin, dass der durch die weichen Federn und Referenzfedern erzielte radiale Zerspanweg mit 1 µm bzw. 4,5 µm nicht ausreichend ist, um die Rauheit der vorangegangenen Honprozesse (D172 Mischkorn, D35) zu entfernen. Mit 8,5 µm entspricht die durch die harten Federn verursachte radiale Zerspanung nicht dem Richtwert von ca. 1/3 bis 1/2 der Länge der zuvor eingesetzten Korngröße [70], jedoch wird der radiale Zerspanweg gegenüber der Referenz nahezu verdoppelt (Erhöhung des nominalen Anpressdrucks von 0,621 MPa auf 0,870 MPa). Weiterhin wird deutlich, dass beim Glätthonen der eingesetzten LDS-Schicht unter einem minimal notwendigen Honleistenanpressdruck p_{AN_Min} von ca. 0,3 MPa keine Materialzerspanung erfolgt.

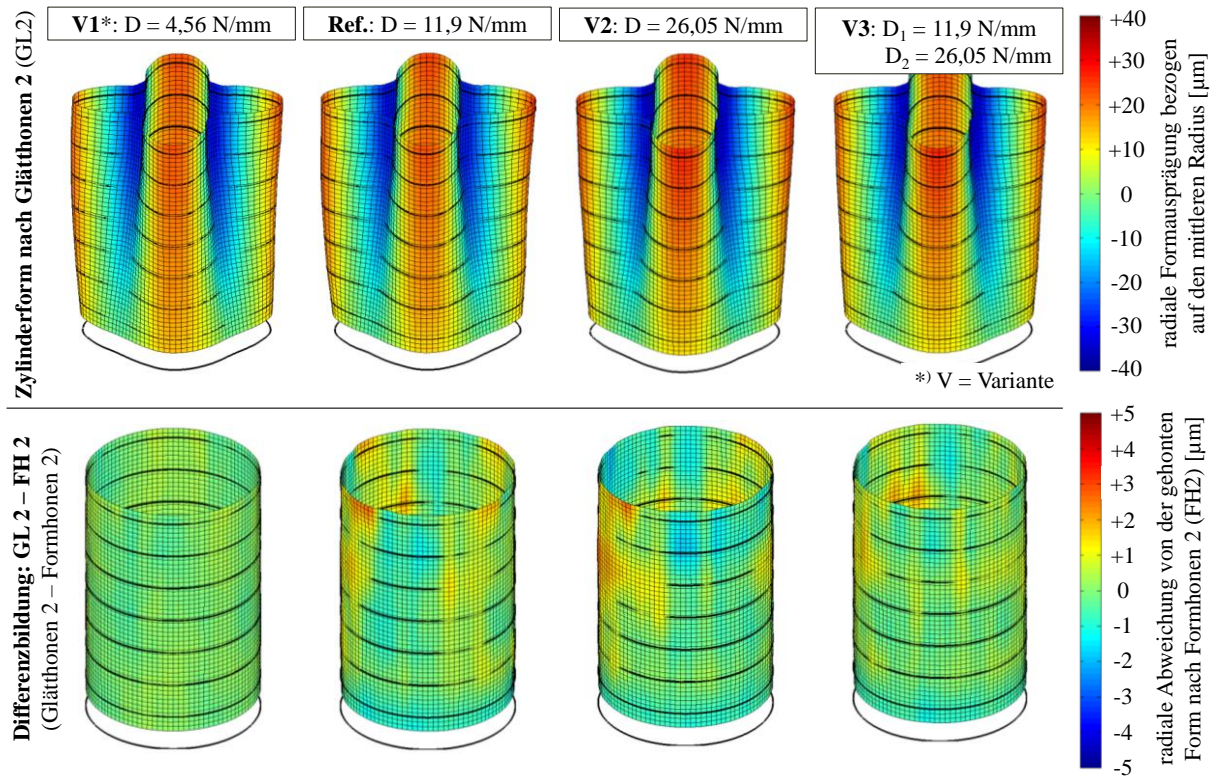


Abbildung 70: Variation Federhärte – Auswirkungen auf Zylinderform

Zusätzlich zur erzielbaren radialen Zerspanung wird der Einfluss der Federhärte auf die Zylinderform bestimmt. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 70 abgebildet. Durch Differenzbildung der Zylinderformen nach dem Glätt- bzw. Formhonen sowie anschließender Durchmesserbereinigung (Filterung der 0. Fourierordnung) zeigt sich, dass die Zerspanung durch die Referenzfedern und die harten Federn keine reine homogene Materialzerspanung verursacht (homogene Materialzerspanung = reine Durchmesseränderung 0. Fourierordnung ohne Einbringung weiterer Formanteile; $FA = 0 \mu\text{m}$; $Q''_w = 0 \mu\text{m}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$). Besonders im oberen Zylinderbereich (größte Formausprägung) kommt es bei der Zerspanung aufgrund der Trägheit des Werkzeuges und dem ständigen Wechsel zwischen den Stellen maximalen und minimalen Bohrungsradius zu leichten Formänderungen ($Q''_w > 0 \mu\text{m}/(\text{s} \cdot \text{mm}^2)$). Das minimal größere Zerspanvolumen wird dabei an den Bohrungseingstellen erzielt. Die geringen Formunterschiede zwischen den Bearbeitungsstufen bei Variante 1 (weiche Feder) sind auf die sehr geringe radiale Zerspanung ($< 1 \mu\text{m}$) zurückzuführen.

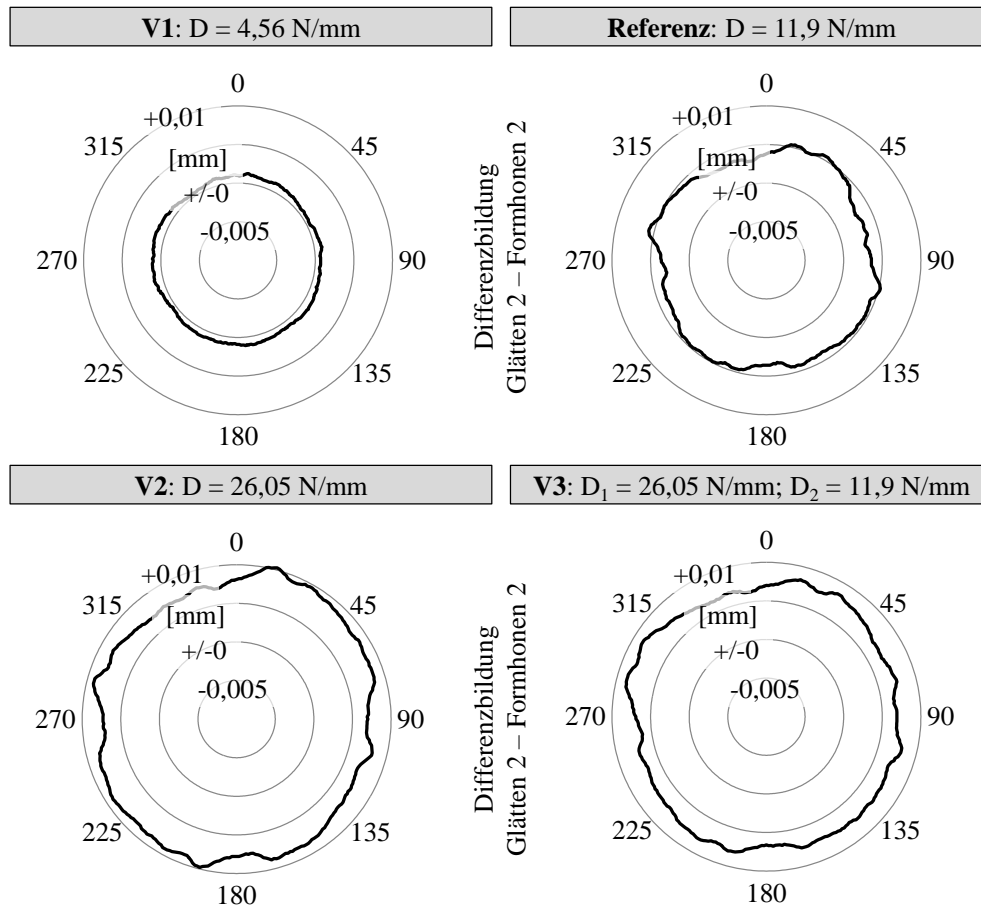


Abbildung 71: Variation Federhärte – Differenzbildung Zylinderform bei max. Formausprägung

Eine genauere Darstellung des Einflusses der Federhärte auf die Zylinderform liefert Abbildung 71. Die Abbildung zeigt für die Stellen maximaler Amplitude (Messebene 2: 22,86 mm unterhalb der KGH-Deckfläche) die Differenzbildung der absoluten Radien für die Prozessschritte Formhonen II und Glättthonen II. Die quantitative Beurteilung des Glättthonprozesses kann durch die Analyse der Differenzform erfolgen. Dabei fällt auf, dass sowohl für die Referenzvariante als auch für die harten Federelemente ($D = 26,05 \text{ N/mm}$) Formabweichungen im Rahmen gängiger Produktionsstandards kleiner $\pm 3,5 \mu\text{m}$ ermittelt werden können. Durch Summenbildung der Formfehler vor und nach dem zweistufigen Glättthonprozess können diese jedoch die vorgegebenen Toleranzen (Kapitel 4.4.1) übersteigen. Daher muss der Prozessschritt des Glättthons mit in den in Kapitel 4.3 beschriebenen Formeinrichtprozess integriert werden, wodurch die Sollformabweichungen auf ein Minimum reduziert werden können.

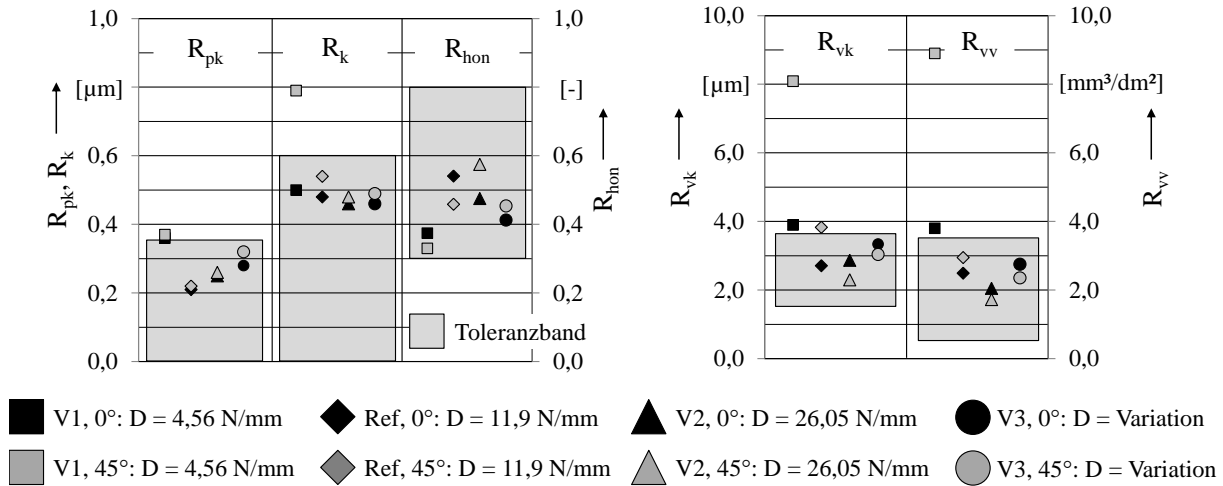


Abbildung 72: Variation Federhärte – taktile 2D-Rauheitskennwerte

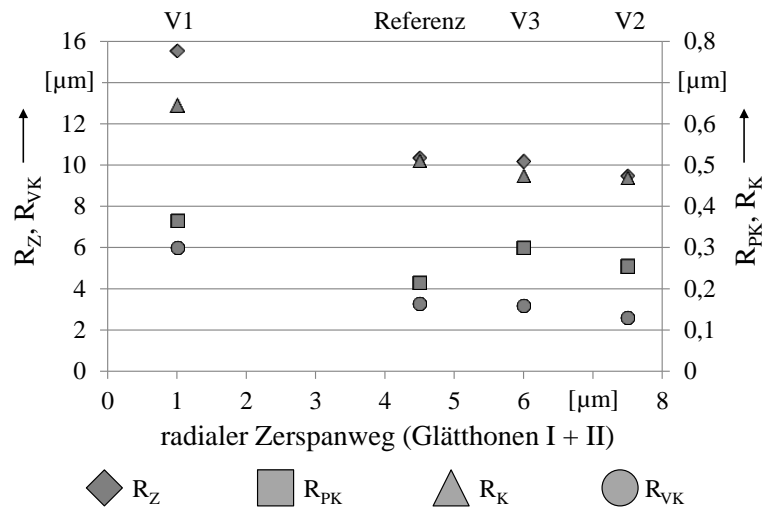


Abbildung 73: Rauheit nach Glätthonen II in Abhängigkeit des radialen Zerspanwegs

Die Einhaltung der vorgegebenen Formtoleranzen erfüllt allerdings nur eines der Qualitätskriterien. Eine Bewertung der aus den unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten resultierenden Oberflächen ist in Abbildung 72 dargestellt. Abbildung 73 zeigt die Rauheit in Abhängigkeit des radialen Zerspanwegs. Wie vermutet führt eine Reduktion der Federhärte (V1) zu einer Verschlechterung der Rauheitskenngrößen R_{pk} , R_k und R_{vk} . Dies kann auf die sehr geringe radiale Zerspanung ($< 1 \mu\text{m}$) aufgrund des geringen Honleistenanpressdrucks der weichen Federn ($D_w = 4,559 \text{ N/mm}$; $p_{AN_w} = 0,378 \text{ MPa}$) zurückgeführt werden. Dadurch werden die geforderte Oberflächengüte und die zum Egalisieren der Ausgangsrauheit benötigte Mindestzerpanmasse nicht erreicht. Für V1 zeigen die gemessenen Rauheiten hauptsächlich die Oberfläche des vorausgegangenen Prozessschritts (Formhonen II).

Die Varianten V2 und V3 zeichnen sich gegenüber der Referenzbohrung dahingehend aus, dass die Kernrautiefe R_k sowie die reduzierte Riefentiefe R_{vk} durch die bessere Glättung der Topographie verringert werden. Dieser Effekt steht dabei in direktem Zusammenhang mit der Erhöhung des radialen Zerspanwegs infolge der anwachsenden Honleistenanpressdrücke.

Gemäß Abbildung 73 wird deutlich, dass sich mit zunehmendem radialen Zerspanweg die Rauheitskenngrößen R_z , R_k und R_{vk} asymptotisch einem honleistenspezifischen und normalkraftabhängigen Optimum annähern. Im Gegensatz dazu steigt die reduzierte Spitzhöhe R_{pk} an. Das durch den Anpressdruck definierte tiefere Eindringen der einzelnen Diamantschneidkörner bewirkt deutlicher ausgeprägte Honriefen, welche Einfluss auf die aus dem Kernbereich herausstehenden Rauheitsspitzen (R_{pk}) nehmen. Die durch die härteren Federelemente herbeigeführten Änderungen liegen für die Varianten V2 und V3 jedoch im Rahmen des zulässigen R_{pk} -Toleranzbereichs; für V3 (unterschiedliche Federhärten für die Operationen Glätthonen I und II) sind die erfassten R_{pk} -Werte allerdings grenzlagig. Die während des ersten Glätthonprozesses eingesetzten härteren Federelemente ($D = 26,05 \text{ N/mm}$) bewirken gegenüber dem Referenzprozess einen Anstieg der Riefentiefe. Im Folgeprozess können die stärker ausgeprägten Honriefen mit den weicheren Referenzfedern ($D = 11,86 \text{ N/mm}$) nicht mehr egalisiert werden.

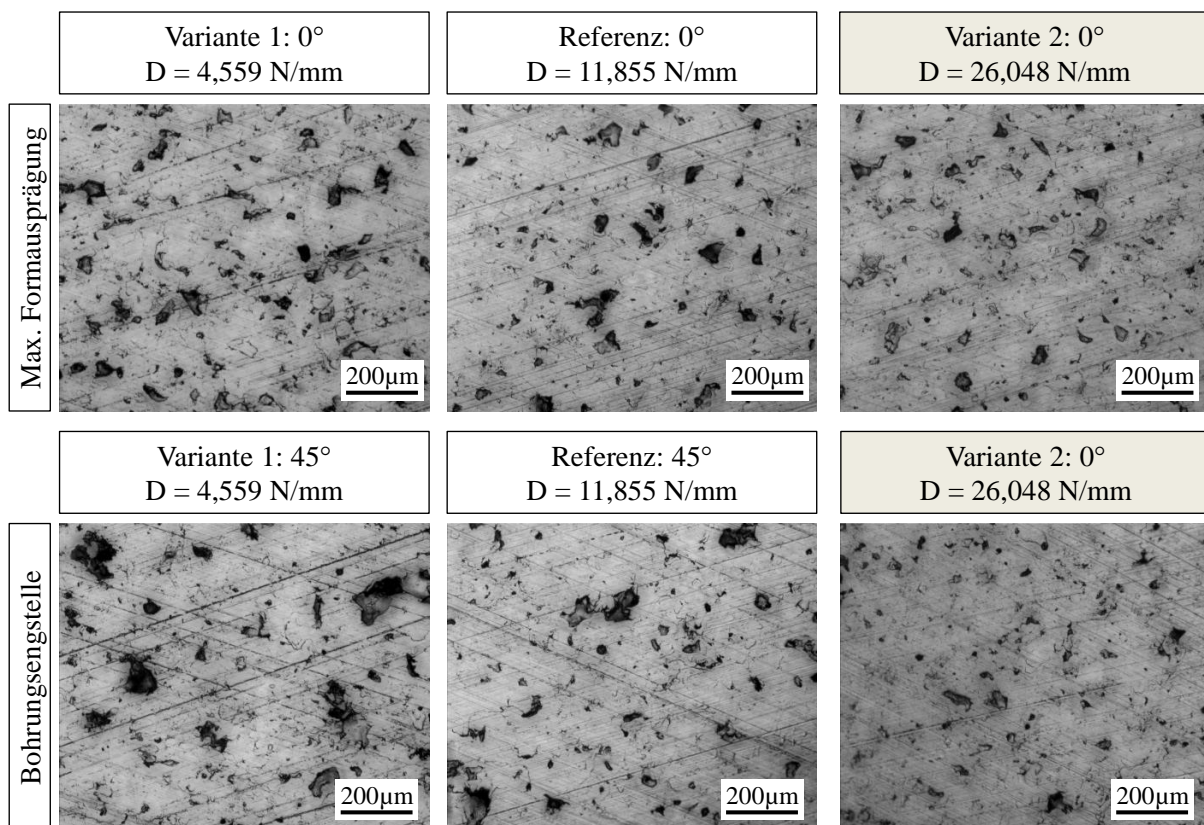


Abbildung 74: Variation Federhärte – Faxfilmaufnahmen

Im Rahmen dieser Versuchsreihe konnte kein Einfluss der Federhärte auf den Honleistenverschleiß bei der Glätthonbearbeitung festgestellt werden. Die in Abbildung 74 dargestellten Oberflächenaufnahmen belegen die diskutierten taktilen Rauheitskenngrößen und zeigen, dass durch die Erhöhung des Honleistenanpressdrucks bei der Glätthonbearbeitung eine verbesserte Oberflächengüte erreicht wird. Dies zeigt sich in der geringeren Anzahl an Schichtausbrüchen, dem Freilegen der in der LDS-Schicht enthaltenen Poren sowie einer gleichmäßigen und feinen Riefenstruktur. Eine Reduktion der Federhärte sowie eine Variation der Federhärte zwischen den Prozessschritten Glätthonen I und II sind aus Sicht des resultierenden Bearbeitungsergebnisses nicht empfehlenswert. Ein zeitlich gesteuerter Glätthonprozess mit konstantem Anpressdruck p_{AN} unter Verwendung des Formhonwerkzeugs ist ebenfalls nachhaltig zu bewerten, da hierbei lediglich ein Drittel der Honleistenfläche gegenüber dem verwendeten Glätthonwerkzeug zur Verfügung steht. (Anmerkung: Werden Glätthonleisten in das aktive Formhonwerkzeug eingesetzt, so können 4 Honleisten à 80 mm^2 Leistenfläche verwendet werden. Das Glätthonwerkzeug sieht 12 Honleisten à 80 mm^2 Leistenfläche vor. Siehe hierzu auch Kapitel 4.2.) Die geringere Honleistenfläche steht im Konflikt mit der Forderung nach einer verkürzten Glätthonzeit.

Zusammenfassung: Variation Anpressdruck beim Glätthonen

Die gezielte Veränderung des Anpressdrucks beim Glätthonen liefert folgende Erkenntnisse:

- Es zeigt sich näherungsweise eine Proportionalität zwischen dem Anstieg der Federhärte D , dem steigenden Honleistenanpressdruck p_{AN} und dem radialen Zerspanweg.
- Für die untersuchten Schneidmittel erfolgt beim Glätthonen der eingesetzten LDS-Schicht unter einem minimal notwendigen Honleistenanpressdruck p_{AN_Min} von ca. 0,3 MPa keine Materialzerspanung.
- Beim Glätthonen steigen mit zunehmendem Honleistenanpressdruck (zunehmender Federhärte) die Formabweichungen. Es konnten Formabweichungen bis $\pm 3,5 \text{ }\mu\text{m}$ ermittelt werden.
- Das Glätthonen muss in den Formeinrichtprozess integriert werden, wodurch die Sollformabweichungen auf ein Minimum reduziert werden können.
- Mit zunehmendem radialen Zerspanweg nähern sich die Rauheitskenngrößen R_z , R_k und R_{vk} asymptotisch einem honleistenspezifischen und normalkraftabhängigen Optimum an.
- Harte Federn beim Glätthonen ($D_h = 26,048 \text{ N/mm}$) konnten die Oberflächentopographie verbessern.

6 Schneidstoffvariation

Die Ergebnisse in diesem Kapitel basieren auf dem in Kapitel 4.5 dargestellten Versuchsprogramm. Erste Ergebnisse zu diesem Kapitel sowie Teile der Zusammenfassung sind bereits in [241] veröffentlicht.

6.1 Versuchsbeschreibung

In den vier Prozessschritten (Formhonen I/II und Glätthonen I/II) sollen für die Form- und Glätthonleisten unterschiedliche Korngrößen untersucht sowie deren Auswirkung auf Zerspanvolumen, radiale Formausprägung, Rauheit und Honleistenverschleiß bewertet werden. Die Bearbeitungsparameter können Tabelle 9, Variante „Ref“ inkl. der darin enthaltenen Querverweise entnommen werden. Beim Formhonen wird neben der zeitlichen, äquidistanten Skalierung der Ansteuerspannung der rechnerische Anlegedruck $p_{AN} = 0,91 \text{ N/mm}^2$ verwendet. Beim Glätthonen werden Federsegmente mit einer Federhärte $D = 11,9 \text{ N/mm}$ eingesetzt.

Für die Bearbeitungsversuche werden in den unterschiedlichen Honstufen die Korngrößen der Diamanthonleisten, ausgehend von den Referenzkorngrößen D172 (Mischkorn; Formhonen I), D35 (Formhonen II), D30 (Glätthonen I) sowie D15 (Glätthonen II), variiert (siehe Tabelle 11). Zusätzlich werden folgende Randbedingungen vereinbart:

- Die im ersten Formhonschritt des Referenzprozesses erzielte sehr hohe Rauheit, kann insbesondere an der Bohrungseingangsstelle im weiteren Prozessverlauf nur unter Anpassung des Verlustaufmaßes egalisiert werden (siehe Kapitel 5.5). Daher werden für diesen Prozessschritt lediglich kleinere Korngrößen untersucht.
- Für die Prozessschritte Formhonen II sowie Glätthonen I werden die Korngrößen D45, D35 und D30 untersucht. Da in diesen Prozessschritten neben einem möglichst hohen Zerspanvolumen bereits ein erstes Einglätten der Oberfläche erfolgen soll, wird die Vorauswahl der Korngröße auf eine D45-Körnung (obere Grenze) sowie eine D30-Körnung (untere Grenze) begrenzt.
- Die Untersuchungen aus Kapitel 5 zeigen, dass die Referenzkörnung D15 bei der Glätthonbearbeitung bereits sehr glatte Plateaus bei sehr geringer Zerspanmasse erzeugt. Da noch glattere Plateaus nicht gefordert werden, soll für den Prozessschritt Glätthonen II lediglich ein größeres Korn getestet werden.
- Kornwerkstoff und –art, Bindungswerkstoff sowie Schneidmittelkonzentration gehen als Konstanten in die Versuchsplanung ein.

- Um eine möglichst hohe Aussagekraft der Ergebnisse zu generieren, erfolgt bei der Versuchsdurchführung eine vollständige Permutation der ausgewählten Schneidmittel.

Tabelle 11: Vorauswahl der Schneidmittelvarianten - Variation der Korngröße

Variation der Korngrößen je Prozessschritt				
Prozessschritt	Formhonen I	Formhonen II	Glätthonen I	Glätthonen II
Referenzprozess	D172 (Mischkorn)	D35	D30	D15
Vorauswahl der Schneidmittel	D91	D45	D45	D20
	D76	D35	D35	D15
	D64	D30	D30	

Die Sollform wird für den Referenzprozess iterativ eingefahren. Aus Gründen der Vergleichbarkeit erfolgt für die weiteren Schneidmittelvarianten die Bearbeitung unter Nutzung dieser iterierten Ansteuerspannungen und gleichbleibender Bearbeitungsparameter. Schneidmittelabhängige Abweichungen im Honergebnis gegenüber der Referenzbohrung können so für jeden Prozessschritt bewertet werden. Weiterhin wird im Anschluss an die Auswertung für die vielversprechendste Schneidmittelkombination die Sollform iterativ eingefahren und das Arbeitsergebnis dem der Referenzbohrung gegenübergestellt. Dies stellt eine Vergleichbarkeit der beiden Varianten sicher.

Zusätzlich zur Variation der Formhonleisten erfolgt für die optimierte Schneidmittelkombination eine Versuchsreihe, bei der die Hartmetallstützleisten durch hochkonzentrierte, feinkörnige Diamantleisten (D20) ersetzt werden. Motivation dabei ist, eine prognostizierte, negative Beeinflussung (wie z. B. Randzonenverfestigungen, Materialverschiebungen oder Lamellenausbrüche) der eingesetzten LDS-Schicht durch die nicht schneidenden Hartmetallstützleisten zu vermeiden.

6.2 Variation der Korngröße der Formhonleisten

Entsprechend Kapitel 6.1 wird die Sollform (siehe Abbildung 62) für die Referenzschneidmittelfolge (Formhonen I: D172 Mischkorn | Formhonen II: D35 | Glätthonen I: D30 | Glätthonen II: D15) iterativ angepasst. Die anschließende Bearbeitung der einzelnen Varianten (unterschiedliche Korngrößen) erfolgt unter Verwendung der iterierten Ansteuermatrix sowie der festgelegten Skalierungsart, –schrittweite und –anzahl bei identischer Honzeit. Bei den eingesetzten Schneidmitteln wird Diamant als Schneidwerkstoff verwendet. Mit Ausnahme des Prozessschrittes Formhonen I (Fraktionierung durch Sieben) erfolgt die Fraktionierung der blockigen Schneidköner durch Schlämmen. Als Bindungstypen werden je nach Prozessschritt unterschiedliche Hartmetall- bzw. Metallbindungen angewandt. Die Schneidmittelkonzentrationen betragen für die Formhonbearbeitung 12,5 Vol.% (2,2 Kt/cm³), für die Glätthonbearbeitung I 8,75 Vol.% (1,54 Kt/cm³) und 18,8°Vol.% (3,3 Kt/cm³) für den Prozess Glätthonen II. Die vergleichsweise geringe Konzentration soll eine höhere Schnittfreudigkeit der höher belasteten „wenigen“ Einzelkörner begünstigen.

6.2.1 Schneidstoffauswahl im Prozess Formhonen I

Die Hauptaufgabe des ersten Formhonschritts besteht darin, einen sehr hohen Anteil des Soll-Zerspanvolumens zu erzielen sowie die definierte Sollform möglichst gut abzubilden. Gleichzeitig muss die erzeugte Oberflächenrauheit in den Folgeprozessen egalisiert werden. Um ein hohes Zerspanvolumen zum Zerspanen der Ausgangsrauheit in den nachgelagerten Prozessen zu vermeiden, soll für den Arbeitsschritt Formhonen I die Korngröße gefunden werden, welche bei ausreichendem Zerspanvolumen die geringste Rauheit erzielt. Da die Korngröße des D172 Mischkorns des Referenzprozesses bereits über dem Industriestandard für sogenannte Vorhonoroperationen liegt (mittlere Korngröße nach [65] zwischen 58 µm und 116 µm) und die Erreichung der geforderten Oberflächengüte den kritischen Erfolgsfaktor darstellt, werden lediglich kleinere Korngrößen untersucht. Ein weiteres Auswahlkriterium stellt der Honleistenverschleiß je Bohrung dar. Dieser soll einerseits möglichst gering sein, zum anderen soll durch den Verschleiß ein optimaler Selbstschärfefeekt der Schneidkörner erzielt werden. Da ein Überschleifen der Formhonleisten bei der Werkzeugaufbereitung nur bei Anbindung an der zugehörigen Piezoeinheit durchgeführt werden kann (Ausgleich der Fertigungstoleranzen an der Zustelleinheit), muss neben der hohen Schneidmittelstandzeit ein schneller Honleisten-einlauf gewährleistet sein. Dieser wird entgegen der Standzeitforderung durch einen erhöhten Honleistenverschleiß begünstigt. Die auf Basis dieser Kriterien ausgewählten Schneidmittel sind in Abbildung 75 dargestellt. Für die vorliegende Versuchsreihe wurde unter Vernachlässigung eines D107 eine lineare Abstufung der Korngröße gewählt.

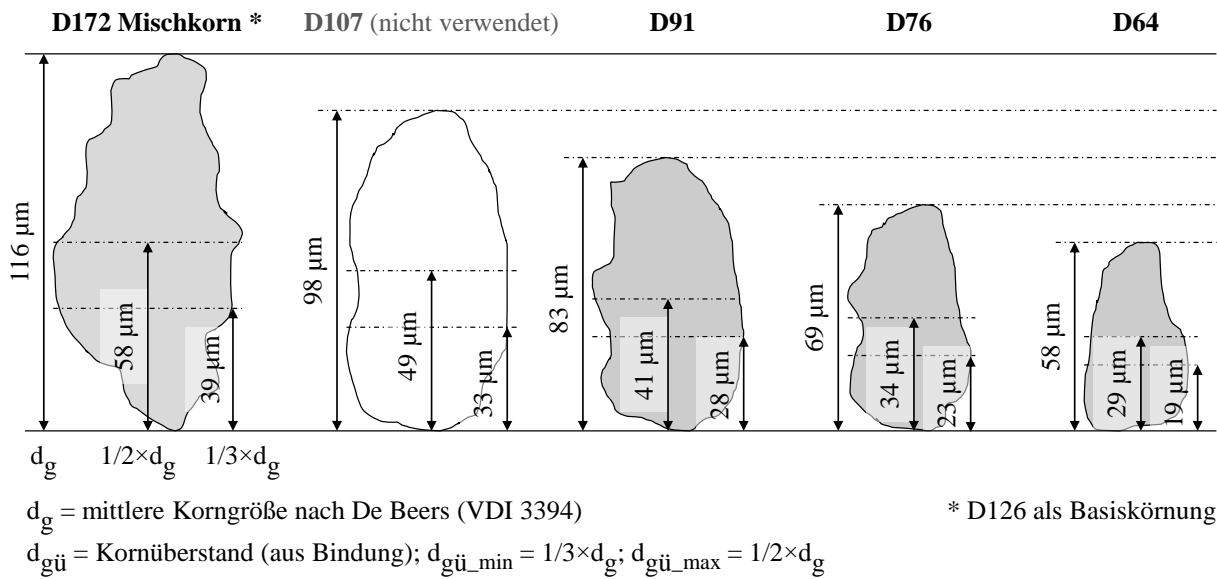


Abbildung 75: Formhonen I – Mittlere Korngröße und nomineller Kornüberstand

Abbildung 76 zeigt die radiale Formausprägung FA sowie die Rautiefe R_z in Abhängigkeit der Korngröße. Die im Diagramm enthaltenen Fehlerindikatoren beschreiben jeweils die Extrema aller erfassten Messwerte bzw. der daraus berechneten Werte. Aufgrund des geringeren Schneidvermögens kleinerer Körnungen fallen die radiale Formausprägung (Abbildung 76) sowie das erzielte Zerspanvolumen (Abbildung 77) mit sinkender Korngröße ab. Weiterhin kann eine Reduktion der gemittelten Rautiefe (R_z -Wert) mit kleiner werdendem Schneidkorn verzeichnet werden. Die Rauheit der Referenzvariante ohne zeitliche Skalierung der Ansteuerspannung weist gegenüber der vergleichbaren Bohrung mit zeitlicher Skalierung zudem eine etwas geringere Rauheit auf. Dieser Unterschied kann auf das geringere Kraftniveau zu Prozessende der Variante „D172 nicht skaliert“ zurückgeführt werden, wodurch die einzelnen Schneidkörner weniger tief in die LDS-Oberfläche eindringen. Entgegen der reduzierten Rauheit sind die Körnungen D76 und D64 aus Sicht der erzielten Formausprägung kritisch zu bewerten, da lediglich 55 % (D76) bzw. 46 % (D64) der Soll-Formausprägung (55 µm) im ersten Formhonschritt erzielt werden. Dies bedeutet gleichzeitig, dass ca. 50 % der Soll-Formausprägung in der zweiten Formhonstufe mit kleinerem Schneidkorn erfolgen muss.

Bearbeitungsparameter Schneidmittelstudie: Formhonen I

Drehzahl	226,5 U/min	Honzzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	Variation
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzzeit FH2	2 x 21,25 s	Honleisten FH2	-
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzzeit GL1	2 x 10,5 s	Honleisten GL1	-
Wechsellauf aktiv	ja	Honzzeit GL2	2 x 10,5 s	Honleisten GL2	-

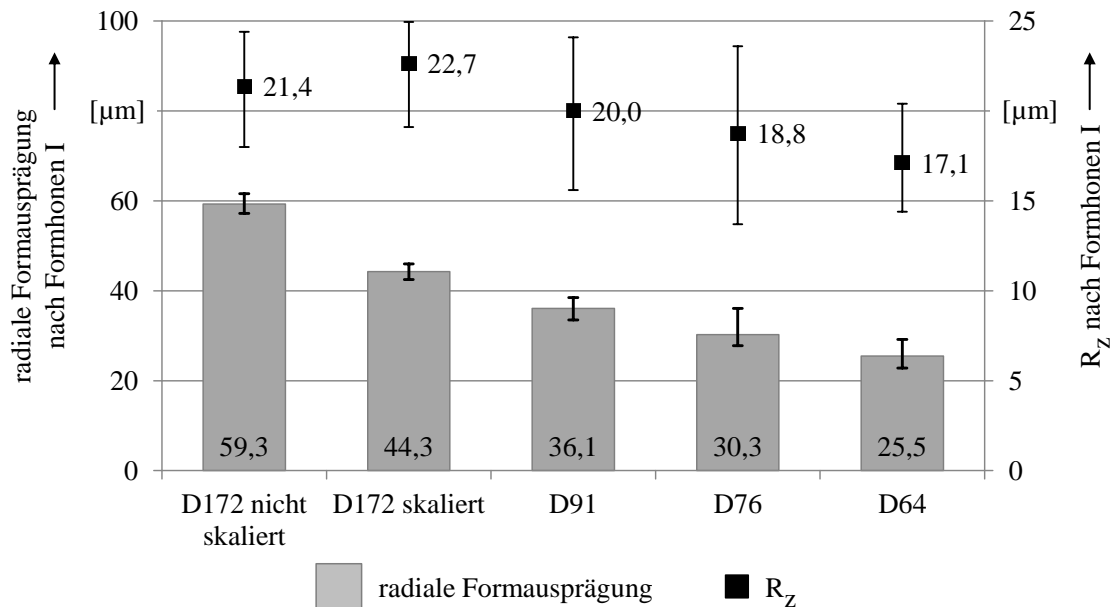


Abbildung 76: Schneidmittelvariation Formhonen I – radiale Formausprägung

Bei Betrachtung der Zerspanvolumina zeigt sich analog zum Stand der Technik ein für das Formhonen gültiger, nahezu linearer Zusammenhang zwischen Korngröße und Zerspanleistung. Die Absolutwerte der in Abbildung 77 dargestellten Volumina teilen sich dabei entsprechend Kapitel 2.4.4 in Anteile homogenen und formgebenden Zerspanvolumens auf. Die vergleichsweise hohen Schwankungen im ermittelten Zerspanvolumen sind neben den allgemeinen Mess- und Fertigungstoleranzen auf die Temperaturschwankungen in der Versuchshalle zurückzuführen. Die zur rechnerischen Ermittlung des Zerspanvolumens notwendigen Bohrungsdurchmesser vor und nach einer Honoperation unterliegen aufgrund der temperaturabhängigen Wärmeausdehnung des Kurbelgehäuses starken Schwankungen. Bei einem Längenausdehnungskoeffizient $\alpha_A = 23,1 \times 10^{-6} \times \text{K}^{-1}$ der verwendeten Aluminium-ZKG mit einem Durchmesser $D = 84 \text{ mm}$ folgt aus einem Temperaturdelta $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ eine Durchmesseränderung von $9,7 \text{ }\mu\text{m}$. Diese temperaturbedingte Durchmesseränderung führt zu einem mathematischen Fehler in der Berechnung des Zerspanvolumens von bis zu ca. 173 mm^3 .

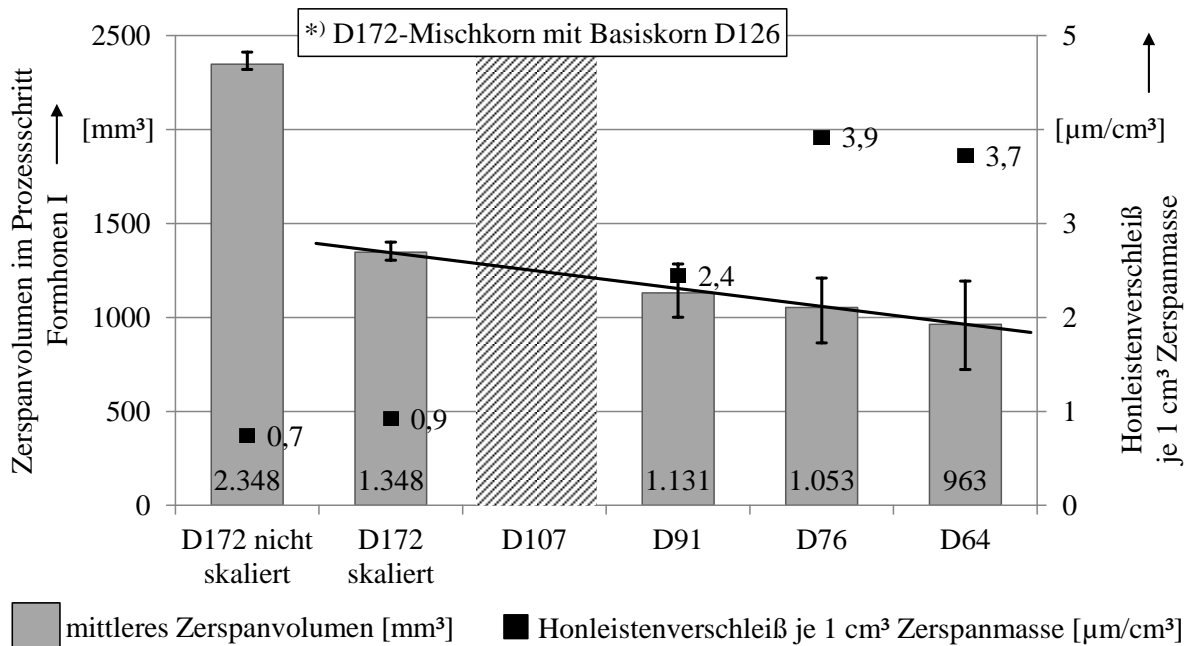


Abbildung 77: Schneidmittelvariation Formhonen I – Zerspanvolumen und Honleistenverschleiß

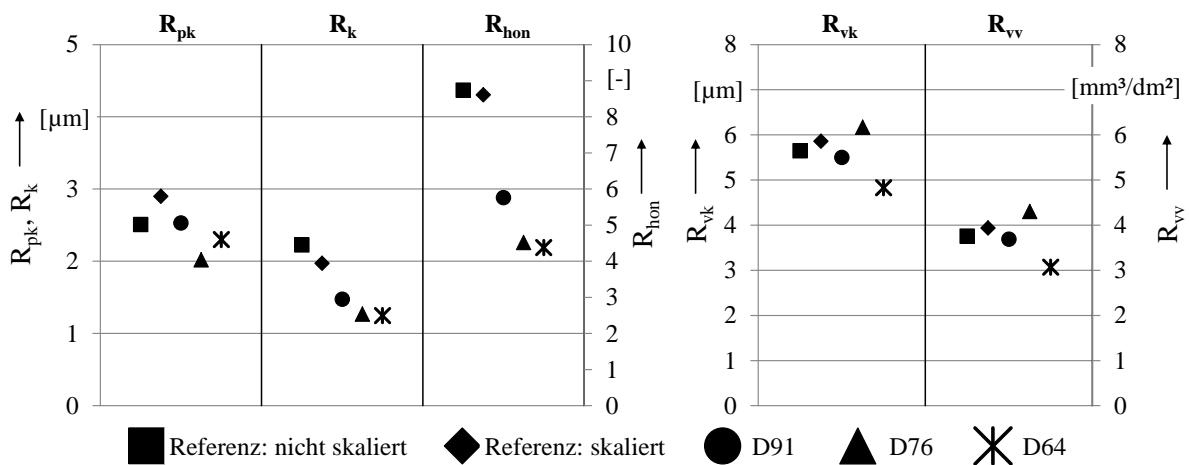


Abbildung 78: Schneidmittelvariation Formhonen I – taktile Rauheitswerte

Ausgehend von der Referenzvariante „D172 skaliert“ kann für die übrigen Korngrößen ein erhöhter Verschleiß der Formhonleisten diagnostiziert werden (siehe Abbildung 77). Durch die höhere Belastung der Schneidkörner bei einer Prozessführung ohne zeitliche Skalierung der Ansteuerspannungen verschleissen diese deutlich schneller. Mit kleiner 3 µm je Bohrung (Zerspanvolumen in [mm³]) liegt der Honleistenverschleiß der Körnung D91 noch in einem akzeptablen Bereich, da dieser bei gegebener Schneidbelagshöhe von 3 mm eine Bearbeitung von ca. 1.070 Bohrungen ermöglicht (Referenz: 2.500 Bohrungen; D76: 730 Bohrungen; D64: 830 Bohrungen). Die eher geringe Diamantkonzentration in den Formhonleisten begünstigt einerseits den raschen Verschleiß der Einzelschneiden. Andererseits sorgt die geringe

Diamantkonzentration in Verbindung mit den formbedingten wechselnden Belastungen für einen günstigen Selbstschärfefeekt der Formhonleisten.

Die in Abbildung 78 dargestellten taktilen Rauheitswerte zeigen einen Einfluss der eingesetzten Korngröße auf die erzielte Kernrautiefe R_k und den mathematisch ermittelten Kennwert R_{hon} (Beschreibung der Honriefen). Die gemessenen taktilen Rauheitswerte sind dabei als Mittelwerte sämtlicher Messungen aus gehonter Bohrungsanzahl, Bohrungsposition (0° , 45°) sowie den jeweiligen Wiederholmessungen zu verstehen. Neben Abbildung 78 gilt dies auch für Abbildung 82, Abbildung 84 sowie Abbildung 85. Die Rauheitskennwerte fallen – aufgrund der geringeren Eindringtiefe kleinerer Körner – mit abnehmendem Schneidkorndurchmesser stark ab. Für den Spitzen- sowie R_{vk} -Bereich können ähnliche, schwach ausgeprägte Trends ermittelt werden, jedoch liegen alle Werte noch deutlich über den definierten Zielkorridoren für die fertige Oberfläche. Die sehr groben Körnungen sorgen während des Zerspanprozesses für große Schichtausbrüche und viele tiefe Honriefen. Dies erfordert in den Folgeprozessen eine hohe Materialzerspannung zum Egalisieren der im ersten Formhonprozess erzielten Topographie.

Eine abschließende fundierte Aussage bezüglich der Tauglichkeit der drei getesteten Korngrößen kann erst nach Analyse des Folgeprozesses erfolgen, in welchem die finale Zylinderform erzeugt wird. Eine Eingrenzung der Varianten erfolgt daher nicht zum gegenwärtigen Zeitpunkt. Allerdings zeigen die Versuche auch, dass die Körnungen D76 und D64 voraussichtlich mit einer vergleichsweise großen Korngröße ($d_g \geq 35 \mu\text{m}$) im zweiten Formhonschritt kombiniert werden müssen, um die geforderte Formausprägung ($55 \mu\text{m}$) zu erzielen.

6.2.2 Schneidstoffauswahl im Prozess Formhonen II

Im Prozessschritt Formhonen II kommen neben der Referenzkörnung D35 je eine größere (D45) und kleinere (D30) Korngröße zum Einsatz. Dies ermöglicht die Auslegung des Honprozesses hinsichtlich einer Erhöhung des Zerspanvolumens (D45) bzw. einer Rauheitsreduzierung (D30).

Bearbeitungsparameter Schneidmittelstudie: Formhonen II

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	Variation
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 21,25 s	Honleisten FH2	Variation
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit GL1	2 x 10,5 s	Honleisten GL1	-
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit GL2	2 x 10,5 s	Honleisten GL2	-

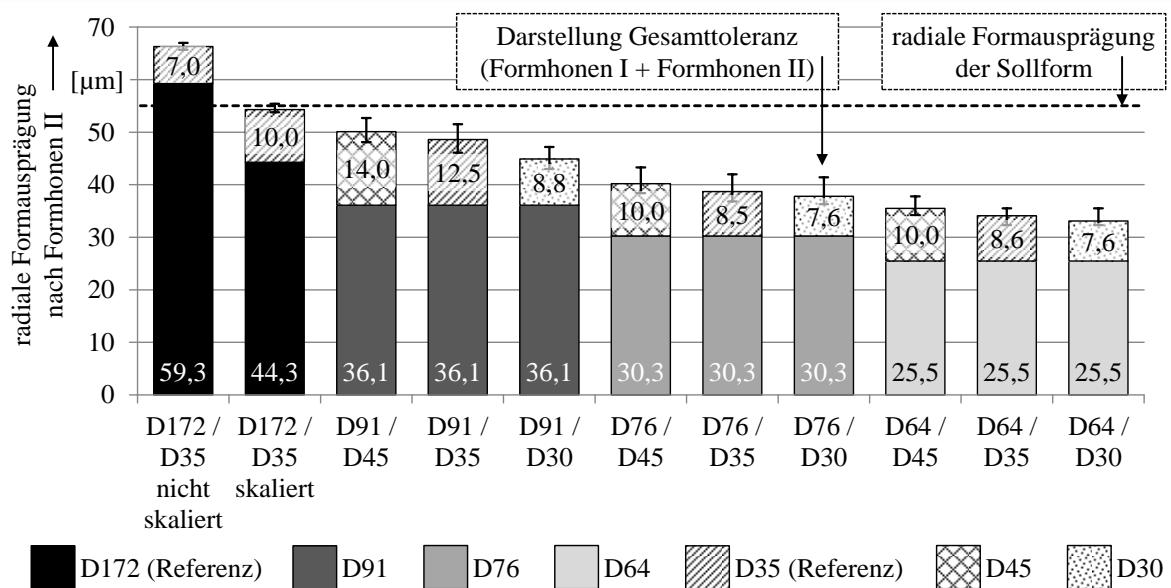


Abbildung 79: Schneidmittelvariation Formhonen II – radiale Formausprägung

Die Summe, der in den beiden Formhonprozessen erzielten radialen Formausprägung, zeigt Abbildung 79. Es zeigt sich, dass durch die Erhöhung des mittleren Korndurchmessers im zweiten Formhonschritt eine größere radiale Formausprägung erzielt wird, welche jedoch nicht zur Kompensation der Zielunterschreitung im ersten Formhonschritt ausreicht. Mit 50,1 µm Formausprägung erreicht die Schneidmittelkombination D91 / D45 lediglich 91,1 % der Sollamplitude von 55 µm. Die Varianten mit der D76-er und D64-er Körnung erzielen dabei weniger als 73 % bzw. 67 % der definierten Zielamplitude. Trotz möglicher Anpassung der Ansteuerspannungsmatrix sowie der Skalierungsschrittweite ist eine Erreichung der geforderten, theoretischen Formausprägung ($FA_{Soll} = 55 \mu\text{m}$) für diese Schneidmittelkombinationen nicht möglich. Dies führt zum Ausschluss der Körnungen D76 und D64 für weitere Betrachtungen in den Prozessschritten Glätthonen I/II.

Darüber hinaus wird entsprechend Abbildung 79 für den Arbeitsschritt Formhonen II eine Abhängigkeit der erzielten Formausprägung von der Vorbearbeitung deutlich. Diese nimmt mit feinerer Ausgangsrauheit (kleinere Korngröße während Formhonen I) ab. Die Streuung der final erzielten Formausprägung bewegt sich zudem im Rahmen der zulässigen Formtoleranzen von $\pm 3 \mu\text{m}$.

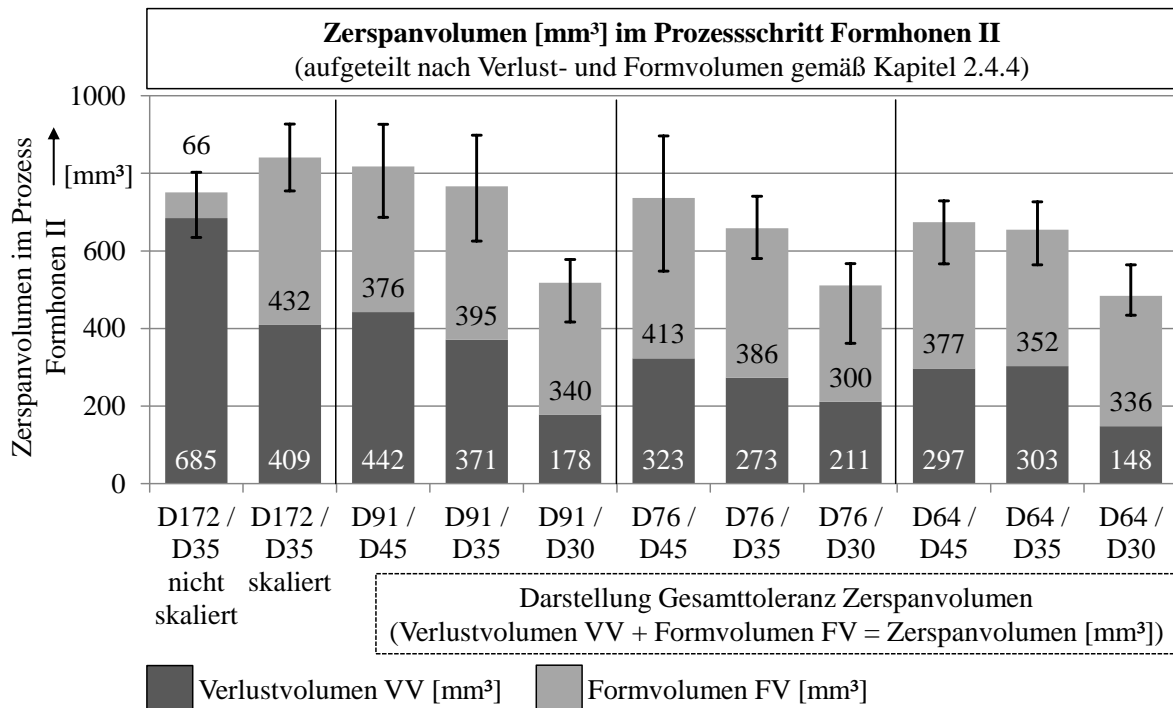


Abbildung 80: Schneidmittelvariation Formhonen II – Verlustvolumen und Formvolumen

Für die Referenzbohrungen weicht die im Prozess Formhonen II erzielte Formausprägung vom Trend der weiteren Schneidmittelkombinationen ab. Die geringere Formausprägung trotz größerer Ausgangsrauheit kann durch das erzielte Zerspanvolumen bzw. dessen Aufteilung in Verlust- und Formvolumen erklärt werden (siehe Abbildung 80). Das Formvolumen verhält sich dabei nicht analog zur Formausprägung, da neben der reinen Amplitudenerhöhung auch weitere Formänderungen auf die Schneidmittelvariation zurückzuführen sind. Die in Abbildung 80 enthaltenen Fehlerbalken zeigen die Minima und Maxima des gesamten Zerspanvolumens als Summe aus Verlust- und Formvolumen. Für die Referenzvariante ohne zeitliche Skalierung der Steuerspannungen tragen nur ca. 10 % des Zerspanvolumens zur Generierung der Sollform bei. Die übrigen 90 % resultieren aus einer homogenen radialen Zerspanung, welche der Glättung der Oberfläche an der Bohrungsengstelle dient. Für die Korngröße D45 ergibt sich ein mittleres Verhältnis aus Verlust- zu Formvolumen von ca. 1:1, für die Körnungen D35 (ohne D172/D35 nicht skaliert) und D30 ein Verhältnis von ca. 1:1,2 bzw. ca. 1:2.

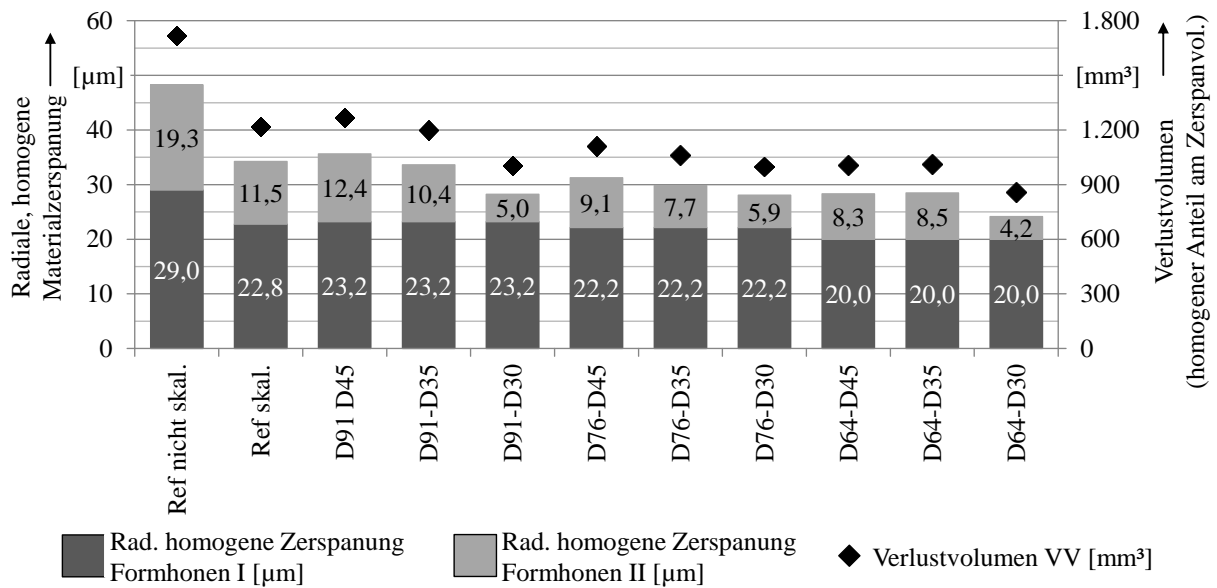


Abbildung 81: Schneidmittelvariation Formhonen I/II – radiale homogene Zerspanung

Bei gegebener Anlegekraft $p_{AN} = 0,91$ MPa sinkt die radiale, homogene Zerspanung mit kleinerer Korngröße bzw. geringerer Ausgangsrauheit (siehe Abbildung 81). Neben dem Anlegewert beeinflusst dies maßgeblich die Materialzerspanung an der Bohrungsengstelle. Wird das Zerspanvolumen an der Bohrungsengstelle in den beiden Formhonschritten addiert, so zeigt sich, dass für die Referenzvariante „D172/D35 skaliert“ das Verhältnis aus Form- und Verlustvolumen nahezu 1:1 beträgt. Ein zusätzliches Bewertungskriterium stellt der erfasste Honleistenverschleiß dar. Gegenüber dem Referenzschneidmittel D35 kann durch den Einsatz der D45-Körnung der Honleistenverschleiß von $4,3 \mu\text{m}$ auf $3,1 \mu\text{m}$ je Bohrung (Zerspanvolumen in $[\text{mm}^3]$) reduziert werden. Dies ermöglicht eine Bearbeitung von knapp 1000 Bohrungen (D35: 700 Bohrungen). Für die Korngröße D30 wurde ein mittlerer Verschleiß von $3,3 \mu\text{m}$ je Bohrung ermittelt. Dies ist auf die deutlich geringere homogene Materialzerspannung zurückzuführen.

Die Auswertung der Rauheitsschriebe (siehe Abbildung 82) bestätigt auch größtenteils für den Prozessschritt Formhonen II die bis dato getroffenen Aussagen. Einerseits sinkt die Rauheit bei kleiner Korngröße, andererseits sind teilweise auch Rauheitsabstufungen in Abhängigkeit der Vorbearbeitung erkennbar. Diese fallen jedoch gegenüber den aus dem Formhonen II resultierenden Rauheitsdeltas geringer aus. Die Rauheiten der Referenzbohrungen weisen – verglichen mit den weiteren Kombinationen – durchschnittliche Absolutwerte auf. Nach Analyse der beiden Formhonschritte und unter Einhaltung der geforderten Standzeit von 1000 Bohrungen, können gegenüber den Referenzhonleisten lediglich Vorteile im Verschleißverhalten des D91 Schneidmittels (verbesserter Honleisteneinlauf) sowie den Korngrößen D45 und D30 (geringerer Honleistenverschleiß) nachgewiesen werden.

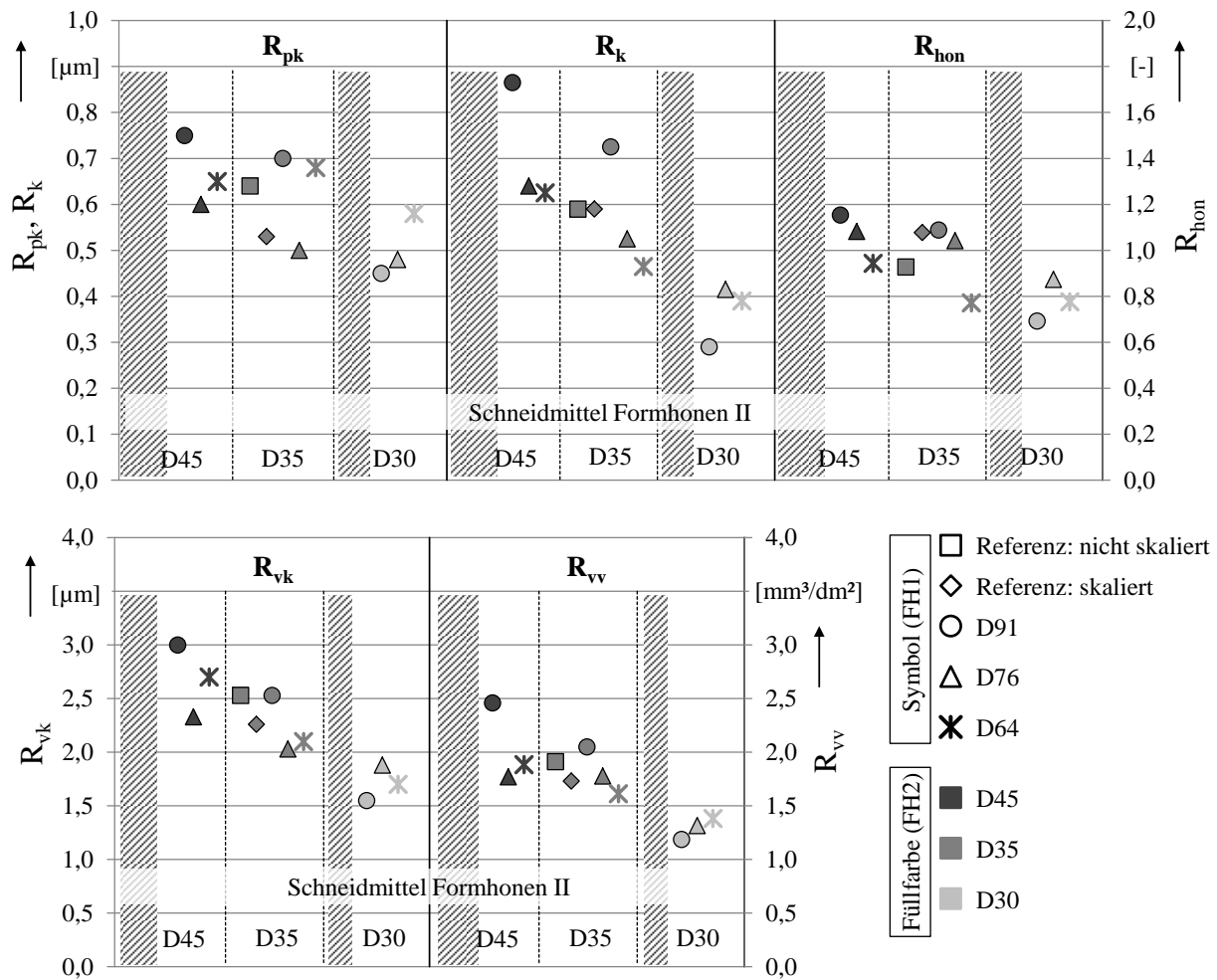


Abbildung 82: Schneidmittelvariation Formhonen II – Rauheit

Für die Schneidmitteluntersuchungen in den folgenden Glätthonprozessen werden entgegen der vollfaktoriellen Versuchsdurchführung ausschließlich die Schneidmittel D91 (Formhonen I), D45, D35, D30 (alle Formhonen II) sowie die Referenzschneidmittel diskutiert. Diese Entscheidung resultiert aus der zu geringen Zerspanleistung der Schneidmittel D76 und D64 in Kombination mit den Schneidmittelvarianten des Prozessschritts Formhonen II sowie der nicht ausreichenden Standzeit (< 1000 Bohrungen) der Körnungen D76 und D64.

6.2.3 Schneidstoffauswahl im Prozess Glätthonen I

In Abbildung 83 sind die Zerspanvolumina der ersten Glätthonoperation dargestellt. Unter der Annahme, dass die gefedert gelagerten Glätthonleisten der zuvor eingebrachten Formkontur nachlaufen, gilt:

- Die Honleistenanpresskraft ist bei jeder Höhe und Winkellage gleichzusetzen mit dem durch die Federkennlinie vorgegebenen Kraftverlauf.
- Die verwendeten Prozessparameter (nominell die Anlagekraft p_{AN}) entsprechen einem Bereich der Federkennlinie bei der die Anpresskraft nahezu konstant verläuft.

- Die gemessene radiale Zerspanung an der Bohrungsengstelle entspricht zugleich der mittleren radialen Zerspanung und kann zur Berechnung des Zerspanvolumens herangezogen werden.

Die äquidistante Aufweitung der formgehten Zylinder bietet die Möglichkeit, durch Auswahl eines Schneidmittels, welches ein hohes Zerspanvolumen während des ersten Glätthonschrittes generiert, die Oberflächentopographie nachträglich entscheidend zu beeinflussen. Durch ein ausreichend hohes Zerspanvolumen können die Ausgangsrauheit egalisiert und die geforderte Rauheit eingestellt werden, ohne die eingebrachte Form zu verändern.

Bearbeitungsparameter Schneidmittelstudie: Glätthonen I

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	D91
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 21,25 s	Honleisten FH2	Variation
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit GL1	2 x 10,5 s	Honleisten GL1	Variation
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit GL2	2 x 10,5 s	Honleisten GL2	-

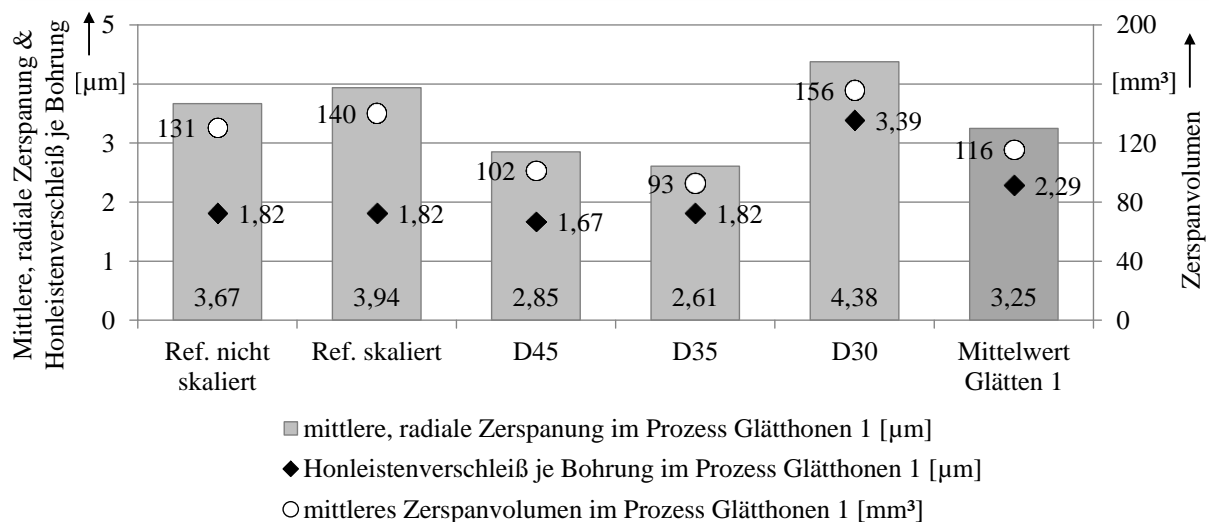


Abbildung 83: Schneidmittelvariation Glätthonen I – radiale Zerspanung und Honleistenverschleiß

Bei allen Varianten ist ersichtlich, dass die D30-Körnung (Referenzschneidmittel) im Mittel das höchste radiale Zerspanvolumen erreicht (Abbildung 83). Die Messung der radialen Zerspanung unterliegt den bereits genannten temperaturbedingten Durchmesserschwankungen. Für die zuvor mit D45 und D30 formgehten Bohrungen ergeben sich dabei leicht höhere Zerspanraten als bei den Referenzbohrungen (Formhonen II: D35). Die geringeren Zerspanvolumina der Glätthon-Schneidmittel D35 und D45 sind womöglich auf eine für diese Korngrößen ungünstige Bindungshärte bzw. Bindermaterial zurückzuführen, welches die verschlissenen oder abgestumpften Schneidkörner zu lange in der Matrix hält. Dies erklärt ebenfalls die hohen Standzeiten (D45: ca. 2400 Bohrungen; D35: ca. 2200 Bohrungen) bei einer

verfügbaren Schneidbelagshöhe von 4 mm. Der deutlich erhöhte Verschleißwert für die D30 Körnung (Standzeit ca. 1180 Bohrungen) ist auf die größere radiale Materialzerspanung zurückzuführen. Der stark abweichende Verschleißwert des bei den Referenzbohrungen ebenfalls zum Einsatz kommenden D30 Schneidmittels ist einerseits der geringen Anzahl an gefertigten Referenzbohrungen und der damit einhergehenden Messungenauigkeit geschuldet. Andererseits bewirkt der Einsatz des D30 Kornes entsprechend Abbildung 84 im Durchschnitt die größte Glättung der Oberfläche (siehe u.a. Entwicklung der reduzierten Spitzenhöhe R_{pk}). Dies führt zu dem Schluss, dass sich die höhere Ausgangsrauheit nach dem Prozessschritt Formhonen II positiv auf das Zerspanverhalten des Schneidmittels D30 auswirkt.

Abbildung 84 zeigt die durch den Prozessschritt Glätthonen I getätigte Rauheitsänderung (Ordinate) gegenüber dem gemittelten Ausgangszustand nach der Formhonzbearbeitung (Abszisse). Dabei zeigen Werte unterhalb der Diagonale eine Reduktion der Oberflächenrauheit an. Für die formgehonten Anlieferzustände der Referenzen sowie der Varianten „D91/D45“ und „D91/D35“ können für alle Schneidmittel der Glätthonzbearbeitung die Ausgangsrauheiten verringert werden. Eine leichte Glättung erfolgt dabei teilweise auch mit größerem Schneidkorn, da diese beim Glätthonen wegen der moderaten Federhärte ($p_{AN} = 0,621 \text{ MPa}$) weniger tief in die LDS-Schicht eindringen. Dieser Effekt trifft bei der Variante „D91/D30“ allerdings nicht zu, da die bereits durch das Formhonen generierte glatte Oberfläche (siehe Abbildung 82) durch die Glätthonz-Schneidmittel D35 sowie D45 erneut aufgeraut wird. Die Verwendung der D30-Körnung erzielt nicht zuletzt aufgrund der hohen Materialzerspanung eine gegenüber dem Ausgangszustand vergleichbar glatte Oberfläche.

Zusammenfassend bietet das Schneidmittel D30 die besten Glätteigenschaften (größte Rauheitsreduktion sowie größte Materialzerspanung), wenngleich die Standzeit der Honleisten mit ca. 1.025 Bohrungen relativ gering ausfällt. Die Wirksamkeit des Schneidmittels zeigt sich ebenfalls in der Analyse der Referenzbohrungen, da diese verglichen mit den übrigen Varianten ähnliche Rauheiten im Anschluss an den ersten Glätthonzschritt aufweisen. Die guten Schneideigenschaften der D30 Körnung führen an dieser Stelle zum Ausschluss der Schneidmittel D35 sowie D45 für weitere Betrachtungen.

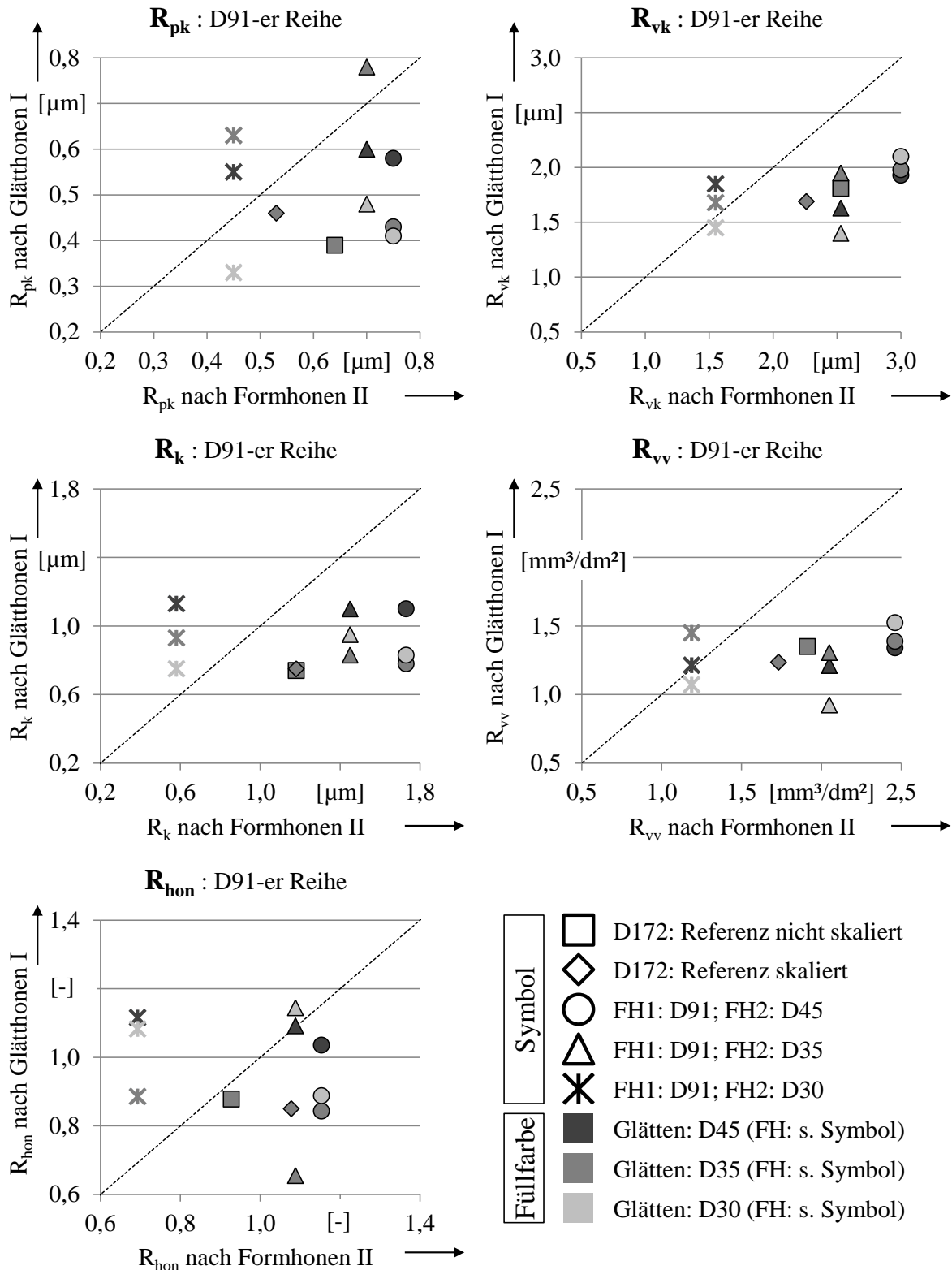


Abbildung 84: Schneidmittelvariation Glätthonen I – Rauheit

6.2.4 Schneidstoffauswahl im Prozess Glätthonen II

Für den Arbeitsschritt „Glätthonen II“ wird neben dem Referenzschneidmittel D15 die Korngröße D20 untersucht. Kleinere Korngrößen werden mangels des geringen Zerspanvermögens nicht analysiert. Weiterhin besteht nach Bewertung der Topographie des Ist-Standes (siehe

Abbildung 43) keine Forderung nach einer feineren Plateauausprägung. Im Gegenteil wird neben einem sauberen Anschnitt der in der LDS-Schicht enthaltenen Poren eine gewisse Honriefenstruktur ($0,3 \leq R_{hon} \leq 0,8$) gefordert.

Bearbeitungsparameter Schneidmittelstudie: Glätthonen II

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit t_h FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	D91
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit t_h FH2	2 x 21,25 s	Honleisten FH2	Variation
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit t_h GL1	2 x 10,5 s	Honleisten GL1	D30
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit t_h GL2	2 x 10,5 s	Honleisten GL2	Variation

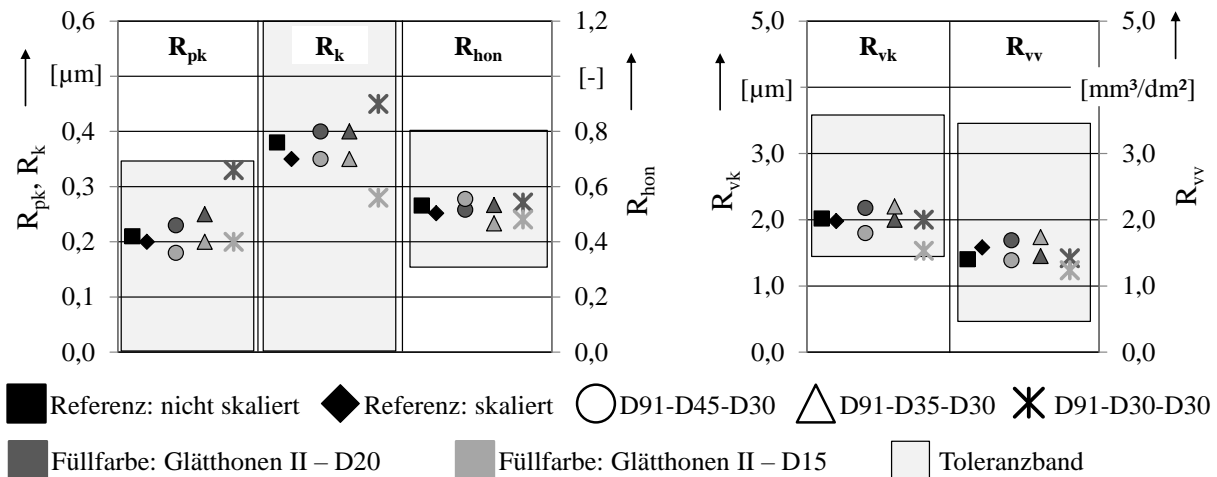


Abbildung 85: Schneidmittelvariation Glätthonen II – Rauheit

Bei der zweiten Glätthonoperation fallen die starken Schwankungen in den Absolutwerten des zerspanten Volumens auf. Neben den Messfehlern bei der Formmessung, sorgen die im Versuchsfeld auftretenden Temperaturschwankungen sowie die Messungenauigkeit der Durchmessererfassung ($\pm 1 \mu\text{m}$ Messtoleranz) zu hohen Ergebnisschwankungen (siehe auch Seite 121f). Für die beiden Korngrößen D15 und D20 können durchschnittliche, radiale Zerspanraten von ca. $1 \mu\text{m}$ bis $1,5 \mu\text{m}$ erfasst werden. Tendenziell wird dabei eine geringere Zerspanmasse erzielt, wenn die Ausgangsrauheit sehr kleine Rauheitsspitzen aufweist. Der durchschnittliche Honleistenverschleiß beträgt für das Referenzschneidmittel D15 $5,7 \mu\text{m}/10$ Bohrungen, für die D20 Honleisten konnte ein Verschleißwert von $2,9 \mu\text{m}/10$ Bohrungen ermittelt werden (Zerspanvolumen je Bohrung in $[\text{mm}^3]$). Eine fundierte Aussage zum Schneidverhalten bzw. zum Selbstschärfefeekt kann beim Glätthonen nicht mehr mit ausreichender Sicherheit getroffen werden, da die daraus resultierenden Differenzen messtechnisch nicht mehr aufgelöst werden können. Daraus folgt, dass zur Beurteilung der Schneidmittel die Rauheitswerte genauer betrachtet werden müssen.

Die Ergebnisse der taktilen Rauheitsmessungen (Abbildung 85) zeigen für die einzelnen Varianten vergleichbare Rauheiten. Im Vergleich zu den mit D15 geglätteten Schneidmittelkonfi-

gurationen liefern die Referenzbohrungen (ebenfalls D15) für den Spitzen- (R_{pk}) und Kernbereich (R_k) leicht erhöhte Rauheitswerte, welche auf die Vorbearbeitung mit der Körnung D172 zurückzuführen sind. Für die Variante „D91-D35-D30-D15“ kann gegenüber der mit D20 geglätteten Variante ein erhöhter R_{vk} Wert ermittelt werden, wobei das Delta der beiden Varianten im Bereich der gängigen Fertigungstoleranz und verfahrensbedingten Schichtporosität liegt. Generell zeigt die Verwendung der D20-Körnung für den Arbeitsschritt Glätthonen II einen Anstieg der Rauheit gegenüber dem Referenzschneidmittel D15. Der aus den Basiswerten errechnete Kennwert R_{hon} zur Beurteilung der Honstruktur liefert für alle untersuchten Varianten ähnliche Absolutwerte. Dennoch kann für die Kennwerte R_{pk} und R_k ein leichter, aber signifikanter Unterschied in Abhängigkeit des gewählten Schneidstoffs sowie der Vorbearbeitung festgestellt werden. Während sich die Rauheit (R_k) nach dem Schritt Glätthonen II für die Körnung D15 in Abhängigkeit der Korngröße des vorangegangenen Honschritts ändert bzw. konstant bleibt (R_{pk}), so steigen die Rauheitskennwerte R_{pk} und R_k für das Schneidmittel D20 mit fallender Korngröße (im Prozessschritt Glätthonen I) an. Weiterhin zeigt das Auflösen der gemittelten Rauheitswerte entsprechend der Messstellen geringe Rauheitsunterschiede zwischen den Stellen maximaler (0°) und minimaler (45°) Formausprägung und bewegen sich somit im Rahmen der Bearbeitungstoleranzen.

Neben dem sehr guten Verschleißverhalten (Standzeit ca. 7000 Bohrungen) weist die D15 Körnung eine dem D20 Schneidmittel entsprechende Zerspanleistung auf und bildet in Kombination mit der verbesserten Topographieausprägung die größten Vorteile für eine Anwendung im Prozessschritt Glätthonen II. Unter den D15 Varianten bietet die Schneidmittelkombination „D91-D45-D30-D15“ die meisten Vorteile (erzielte Formausprägung, Honleistenverschleiß, Rauheit). Einerseits kann durch die Erhöhung der Korngröße im zweiten Formhonschritt ein Teil des fehlenden Zerspanvolumens aus dem Prozess Formhonen I kompensiert werden. Andererseits ermöglichen die für die Schneidmittel D91 und D45 ähnlichen Verschleißwerte eine akzeptable Werkzeugstandzeit (ca. 1000 Bohrungen) und können somit zeitgleich aufbereitet bzw. gewartet werden. Gleichzeitig garantiert der Honleistenverschleiß mit ca. $3 \mu\text{m}/\text{Bohrung}$ ein gutes Einlaufverhalten der Leisten. Gegenüber dem Referenzschneidmittel des Prozesses Formhonen II kann die Standzeit um ca. 43 % verbessert werden. Für die zweistufige Glätthonoperation können durch den Einsatz alternativer Schneidmittel keine Qualitätsvorteile erreicht werden. Eine abschließende Beurteilung der Bearbeitungsqualität der neu ausgewählten Schneidmittelfolge erfolgt anhand der in Abbildung 86 dargestellten Faxfilmaufnahmen.

Entgegen der taktilen Rauheitswerte zeigen die Faxfilmaufnahmen der beiden Referenzvarianten sowie der abgeleiteten neuen Schneidmittelfolge deutliche Topographieunterschiede. Trotz der gemessenen geringen reduzierten Riefentiefe R_{vk} weist die Referenzvariante ohne zeitliche Skalierung der Steuerspannungen eine Vielzahl an Lamellenausbrüchen (Abbildung 86, oben links) auf. Die Häufigkeit großer Poren kann durch Reduktion der Prozesskräfte (Referenz skaliert) bereits sichtbar reduziert werden. Durch Einsatz der getroffenen neuen Schneidmittelauswahl „D91-D45-D30-D15“ kann durch die Reduzierung der Korngröße im ersten Prozessschritt weiteres Verbesserungspotential erschlossen werden. Im Gegensatz zu den Referenzvarianten zeigt sich nicht nur an den Stellen maximaler Formausprägung (0°) bzw. maximaler Prozesskraft eine Verbesserung der LDS-Oberfläche. Durch Reduktion der Riefentiefe wird an der kleinsten lichten Weite (klW) eine geringere Zerspanmasse zum Ausgleich der Ausgangsrauheit notwendig. Dies ermöglicht gegenüber den Referenzvarianten eine Verbesserung der Oberflächengüte an den Bohrungseingängen bei vergleichbarer Prozessführung. Kennzeichnend wird dies durch ein homogeneres Honbild mit einer geringen Anzahl an einzelnen breiten und tiefen Bearbeitungsspuren (Abbildung 86, unten rechts).

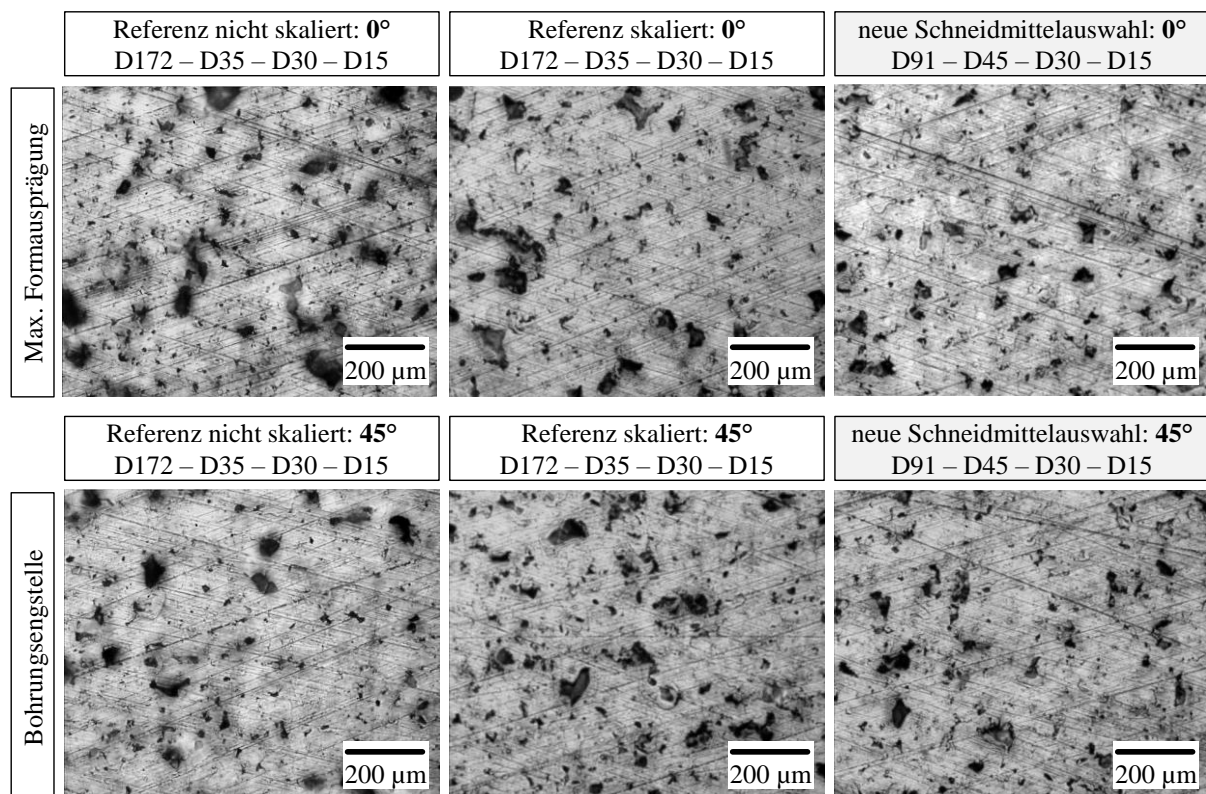


Abbildung 86: Schneidmittelvariation Glätthonen II – Faxbilder

6.3 Ersetzen der Hartmetall-Stützleisten durch feinkörnige Diamantleisten

Die Ergebnisse zur Untersuchung alternativer Schneidmittelkombinationen (siehe Kapitel 6.2) zeigen vor allem an den Stellen maximaler Formausprägung (maximaler Honleistenanpressdruck) eine Verbesserung der Oberflächengüte. Durch den Einsatz eines kleineren Schneidkorns und der damit einhergehenden Rauheitsreduzierung im ersten Formhonschritt sinkt das minimal notwendige Zerspanvolumen an den Bohrungseingstellen zum Egalisieren der Ausgangsrauheit. Die so erzielten Topografieverbesserungen erfüllen die Anforderungen jedoch nicht gänzlich, da durch den Einsatz der Hartmetall-Führungsleisten vereinzelt Randzonenverfestigungen, Materialverschiebungen, plastische Verformungen und Lamellenausbrüche aus der LDS-Schicht vermutet werden können. Diese Vermutung basiert darauf, dass die Hartmetall-Führungsleisten mit einer definierten Kraft ($p_{AN} = 0,40 \text{ MPa}$) angelegt werden und somit im ständigen Kontakt mit der LDS-Oberfläche sind. Da diese Vorgänge in den Prozessschritten Formhonen I/II auftreten, muss eine hohe radiale Materialzerspanung in der Glätthoperation gewährleistet werden.

Einen Ansatz zur Optimierung der Oberflächengüte an den Bohrungseingstellen stellt die Substitution der Hartmetall-Stützleisten durch 6mm breite sowie längs geteilte Diamanthonleisten dar. Die Teilung der Führungsleisten resultiert konzeptbedingt aus den Umlauffedern zur Leistenrückstellung der Schneid- und Führungsleisten (siehe hierzu auch Kapitel 4.2.1). Die blockigen Schneidkristalle der Diamantleisten mit einer mittleren Korngröße von $15 \mu\text{m}$ bis $25 \mu\text{m}$ (D20) weisen eine Konzentration von $5,5 \text{ Kt/cm}^3$ (31,25 Vol.%) auf. Die vergleichsweise hohe Konzentration sorgt für eine Verringerung der Schnittkräfte an den Einzelkörnern und soll gepaart mit der geringen Korngröße eine hohe Materialzerspanung bzw. einen Einfluss auf die Zylinderform bestmöglich verhindern. Parallel soll durch den Einsatz der Diamant-Stützleisten die Oberfläche an den Bohrungseingstellen geglättet werden. Prinzipiell sollen Stützleisten nicht zerspanen. Es wurde hier jedoch versucht feine Diamantleisten als Stützleisten einzusetzen, welche einerseits den radialen Zerspanweg an den Bohrungseingstellen leicht erhöhen und andererseits keine Schichtschädigungen verursachen.

Bearbeitungsparameter Schneidmittelstudie: Ersetzen der Hartmetall-Stützleisten

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	D172
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 21,25 s	Honleisten FH2	D35
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit GL1	-	Honleisten GL1	-
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit GL2	-	Honleisten GL2	-
Ersetzen der 8 Hartmetall-Stützleisten durch 8 zweigeteilte Diamant-Stützleisten mit hoher Konzentration					
Schneidmittel	D20	Maße lang [mm]	6 x 4 x 20 x 4	Maße kurz [mm]	6 x 4 x 60 x 4

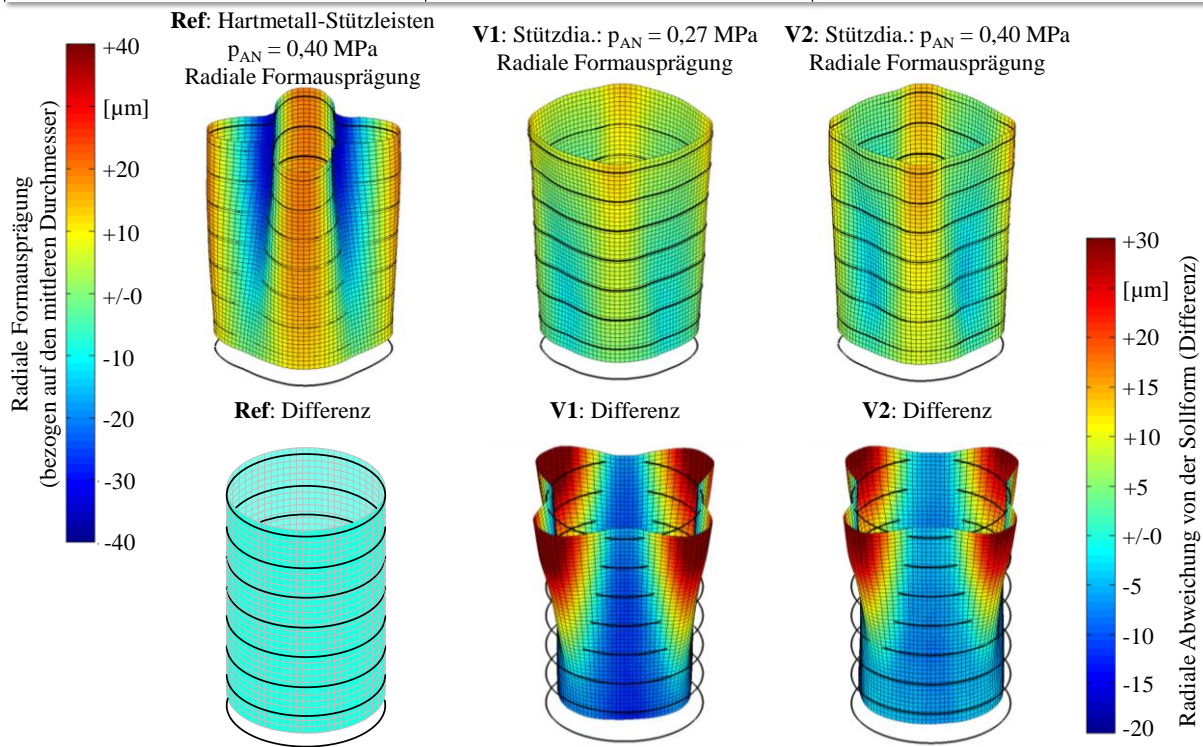


Abbildung 87: Diamant-Stützleisten – Bearbeitungsergebnis im Vergleich zum Referenzprozess

Abbildung 87 zeigt die Bearbeitungsergebnisse nach dem Arbeitsschritt Formhonen II unter Verwendung der Diamant-Stützleisten für zwei unterschiedliche Stützleisten-Anpressdrücke $p_{AN1} = 0,27 \text{ MPa}$ und $p_{AN2} = 0,40 \text{ MPa}$. Neben dem Ersetzen der Hartmetall-Führungsleisten durch die Diamant-Stützleisten werden bei der Versuchsdurchführung die Bearbeitungsparameter gemäß Tabelle 9 bzw. Kapitel 6.1 sowie die Referenzschneidmittelfolge „D172-D35-D30-D15“ verwendet. Die Referenzschneidmittelfolge wurde gewählt, da mit dem D172-Mischkorn das größte verfügbare Korn zum Einsatz kommt, welches zugleich die tiefsten Riefen verursacht. Diese tiefen Riefen müssen in den Folgeprozessen durch die kleineren Schneidmittel bzw. durch die feinkörnigen Diamant-Stützleisten ausgeglichen werden. Gegenüber der Referenzbohrung kann durch den Einsatz der Diamant-Stützleisten bei gleicher Spannungsmatrix lediglich eine maximale Formausprägung von 14 µm (V1) bzw. 11 µm (V2) erzeugt werden (max. 25,5 % der Sollamplitude). Durch Differenzbildung der Varianten „V1“ und „V2“ mit der Referenzbohrung kann eine Aufweitung der Bohrungseng-

stellen als Ursache für die Sollformabweichungen identifiziert werden. Darüber hinaus sind die durch die Diamant-Stützleisten erzielten Zerspanraten für beide Stützleisten-Flächenpressungen (V1: 0,27 MPa | V2: 0,40 MPa) vergleichbar. Ferner lässt die Differenzbildung eine über der Zylinderhöhe ungleichmäßige Materialzerspanung erkennen. Ausgehend von der Kurbelwellenseite nimmt das durch die Stützleisten induzierte Zerspanvolumen mit steigender Zylinderhöhe in Richtung Kurbelgehäuse-Deckfläche zu.

Zur Auflösung des Einflusses der Diamant-Stützleisten auf die Zylinderform erfolgt eine Wiederholung des Versuchsprogramms, bei der jedoch die vier Plätze der Formhonleisten nicht bestückt sind. Eine anschließende Formmessung sowie die daraus abgeleitete Differenzbildung mit der vorgehonten Bohrungsform zeigen den in Abbildung 88 dargestellten Einfluss der Diamant-Stützleisten auf die Bohrungsform. Die durch die Hartmetall-Führungsleisten erzeugten Formänderungen liegen im Bereich der geräte- und rauheitsbedingten Messtoleranzen. Neben dem Andrücken der Rauheitsspitzen aufgrund des Krafteintrags in die LDS-Schicht kann keine spanende Wirkung der Hartmetallleisten festgestellt werden. Die durch die Diamant-Stützleisten im oberen Bohrungsabschnitt hervorgerufene maximale radiale Zerspanung beträgt in Abhängigkeit des Stützleisten-Anpressdrucks $15\text{ }\mu\text{m}$ (V1: $p_{ANI} = 0,27\text{ MPa}$) bzw. $16,5\text{ }\mu\text{m}$ (V2: $p_{AN2} = 0,40\text{ MPa}$). Das hohe Schneidvermögen der Diamant-Stützleisten resultiert in Verbindung mit dem zugehörigen Honleistenüberlauf zudem in einer sich in Richtung Zylinderkopf konisch aufweitenden Bohrungsform. Die höhenabhängigen Durchmesserschwankungen belaufen sich je nach Stützleistenanpressdruck auf bis zu $30\text{ }\mu\text{m}$. Dabei kann für die Variante V1 trotz geringerer Schnittkraft eine gegenüber V2 leicht erhöhte Konizität erfasst werden. Dieses Bearbeitungsergebnis ist auf die geringere Stützwirkung der Diamantleisten bei V1 (geringerer Stützleistenanpressdruck) und dem damit verbundenen Werkzeugtaumeln zurückzuführen.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Honleisten FH1	nicht bestückt
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 21,25 s	Honleisten FH2	nicht bestückt
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit GL1	-	Honleisten GL1	-
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit GL2	-	Honleisten GL2	-
Ersetzen der 8 Hartmetall-Stützleisten durch 8 zweigeteilte Diamant-Stützleisten mit hoher Konzentration					
Schneidmittel	D20	Maße lang [mm]	6 x 4 x 20 x 4	Maße kurz [mm]	6 x 4 x 60 x 4

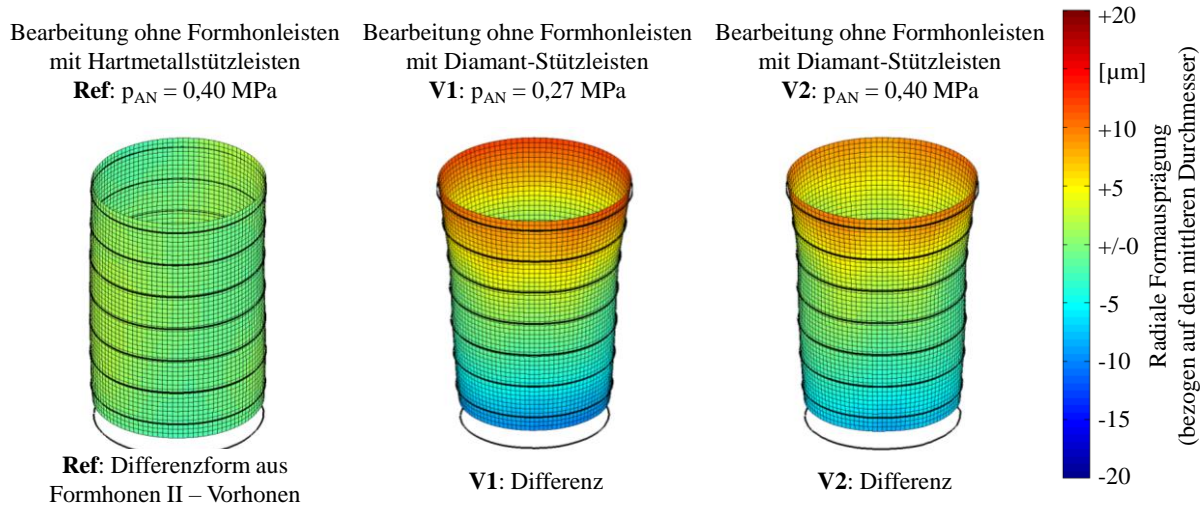


Abbildung 88: Einfluss der Diamant-Stützleisten auf die Bohrungsform

Entsprechend [65] bzw. Kapitel 2.3.1 wird zur Fertigung einer zylindrischen Bohrung ein Honleistenüberlauf von $1/3$ der Honleistenlänge l_h empfohlen. Der kurbelwellenseitige Leistenüberlauf der Diamant-Stützleisten bzw. Hartmetall-Führungsleisten beträgt 6,7 mm ($0,084 \times l_h$; mit $l_h = 80$ mm), an der Kurbelgehäuse-Oberseite ergibt sich wegen der Position der Formhonleisten ein Stützleistenüberlauf von 66,6 mm ($0,83 \times l_h$). Eine Anpassung des Schneidleistenüberlaufs der Diamant-Stützleisten bzw. der Hartmetall-Führungsleisten zur Reduktion der Konizität ist konzeptionell bedingt nicht möglich, da sich dieser nach den aktiven Formhonleisten (je $1/3$ am oberen und unteren Bohrungsende) richtet (Abbildung 27). Die hierdurch eingebrachte Konizität kann durch Anpassung der Sollwertmatrix durch die Formhonleisten nicht ausgeglichen werden. Eine Verwendung der Diamant-Stützleisten ist daher bereits aus makrogeometrischer Sicht nicht umsetzbar. Darüber hinaus ist ein werkzeugseitiges Versetzen der aktiven Formhonleisten in Richtung Werkzeugmitte seitens des eingeschränkten Honfreigangs bei Zylinderkurbelgehäusen nicht möglich. Eine Anpassung der Stützleistenlänge reduziert die axiale Zentrierfähigkeit und Abstützwirkung des Werkzeuges in der Bohrung und kann daher nicht als Maßnahme zur Reduzierung der durch die Stützleisten hervorgerufenen Konizitäten dienen. Die durch diese Maßnahme erzielbaren Topographieverbesserungen nach dem Prozessschritt Formhonen II sind der Vollständigkeit halber in Abbildung 89 dargestellt.

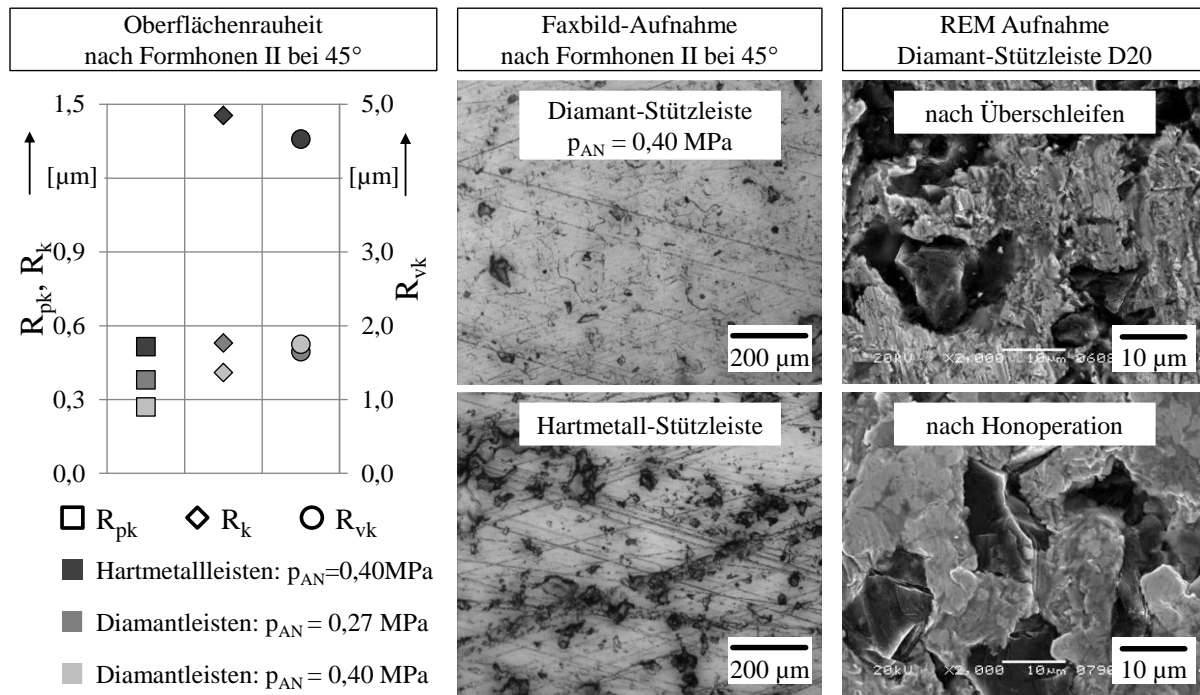


Abbildung 89: Diamant-Stützleisten – Rauheit (links), Faxbilder (Mitte), REM Honleisten (rechts)

Die an den Bohrungsgangstellen ermittelten taktilen Rauheitswerte (Abbildung 89, links) zeigen besonders für die Kennwerte R_k und R_{vk} eine deutliche Verbesserung unter Nutzung der Diamant-Stützleisten. Die erreichten Rauheiten erfüllen an den Messpunkten bereits ohne einen nachgeschalteten Glätthonvorgang die gesteckten Zielvorgaben. Unterstützt werden die Rauheitswerte durch die Faxbildaufnahmen im Anschluss an den zweiten Formhonschritt bei 45° (Abbildung 89, Mitte). Der Referenzprozess (Hartmetall-Stützleisten) weist aufgrund der geringen Materialzerspanung an der kleinsten lichten Weite sehr tiefe Bearbeitungsspuren auf. Die Faxbildanalyse der Varianten mit Diamant-Stützleisten bestätigt die sehr glatte Oberflächenstruktur. Die feinen Honriefen sowie die teils zugeschmierten Poren (Deckelgradbildung: siehe auch Beitrag von Hoffmeister et al. [99]) sind auf den geringen Bearbeitungsdruck ($p_{AN}=0,40\text{MPa}$) zurückzuführen. Der geringe Leistenverschleiß von 1,3 μm /Bohrung (Standzeit ca. 3000 Bohrungen) reicht trotz des geringen Honleistenanpressdrucks aus, um den Selbstschärfefeekt der Diamantleisten zu gewährleisten. Die während der Werkzeugaufbereitung überschleiften Diamant-Stützleisten zeigen im Anschluss an die Bearbeitungsversuche scharfe Schneidkristalle (Abbildung 89, rechts) und liefern dadurch ebenfalls eine Begründung für die vergleichsweise große Zerspanmasse.

6.4 Zusammenfassung - Schneidstoffvariation

Beim Formhonen thermischer Spritzschichten ist zur Erreichung der vorgegebenen Oberflächenkennwerte und Sollformen die Schneidmittelauswahl von besonderer Bedeutung. Die erforderliche lokale Werkstoffzerspanung wird dabei neben der Zustellkraft durch die eingesetzten Schneidmittel bestimmt. Für die Bearbeitung von thermischen Spritzschichten müssen aufgrund der Gefahr von Schichtschädigungen und Partikelausbrüchen die Schneidmittel sorgfältig ausgewählt werden. Im Rahmen der durchgeführten Schneidmittelstudie wurde der Einfluss der Korngrößen auf das Honergebnis in den einzelnen Prozessschritten untersucht und angepasst. Mit dem Ziel der Verringerung der Kernrautiefe wurde für den Prozessschritt Formhonen I die Korngröße auf eine D91-Körnung herabgesetzt. Die so um ca. 2-3 μm reduzierte gemittelte Rautiefe R_z ermöglicht eine bessere Glättung der Oberfläche in den nachfolgenden Honschritten. Gleichzeitig wirkt sich eine kleinere Korngröße negativ auf die erzielte radiale Formausprägung aus. Mittels einer Anhebung der Korngröße im zweiten Formhonschritt von D35 auf D45 konnte die geforderte radiale Formausprägung von 55 μm zu ca. 90 % bis 95 % erzielt werden. Eine Variation der Schneidmittel im zweistufigen Glätthonprozess führte zu keiner Verbesserung des Honergebnisses, weshalb die Referenzschneidmittel D30 und D15 nicht geändert wurden.

Die neue Schneidmittelauswahl „D91-D45-D30-D15“ zeigt im Vergleich zu den Referenzvarianten folgende Änderungen. Einerseits kann durch den Einsatz der kleineren Korngröße im Bearbeitungsschritt Formhonen I die geforderte Sollformamplitude von 55 μm nur zu ca. 90 % bis 95 % erreicht werden. Andererseits konnten dadurch die reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} sowie die reduzierte Riefentiefe R_{vk} um ca. 10 % verbessert werden. Eine wesentliche Verbesserung der Oberflächetopographie konnte anhand der Beurteilung der Faxfilmaufnahme nachgewiesen werden. Aufgezeigt werden kann dies durch ein über der gesamten Zylinderbohrung gleichmäßigeres Honbild mit einer geringen Anzahl an einzelnen breiten und tiefen Bearbeitungsspuren bzw. Schichtausbrüchen. Zur Glättung der Honstruktur erfordert die gegenüber dem Referenzstand geringere Rauheit nach dem Honschritt Formhonen I im Folgeprozess eine geringere Materialzerspanung an der Bohrungseingestelle.

Durch den Einsatz der feinkörnigen Diamant-Stützleisten kann die Topographie wie beabsichtigt an den Bohrungseingestellen positiv beeinflusst werden. Dem entgegen wirkt jedoch der negative Einfluss der Diamant-Stützleisten auf die Bohrungsgeometrie. Die konische Bohrungsausprägung sowie die mangelnde Amplitudenausbildung verhindern einen Austausch der Hartmetall-Führungsleisten. Weitere Optimierungsmaßnahmen, wie eine Anpassung der

Schneidmittelspezifikation und/oder der Bearbeitungsparameter können die durch diese Maßnahme entstandenen Nachteile nicht ausgleichen.

7 Normalkraftmessung an der Formhonleiste

In diesem Kapitel wird eine Messmethodik zur Erfassung und Auswertung der radial wirkenden Honkräfte beschrieben. Die Entwicklung dieser Methodik schließt eine quasistatische Erprobung des piezoelektrischen Werkzeugs zwecks Validierung der In-Prozess-Kraftmessergebnisse ein. Ferner liefern die quasistatischen Versuche Kenntnisse über das mechanische Übertragungsverhalten des Formhonwerkzeugs. Erste Ergebnisse dieses Arbeitspakets sowie Teile der Zusammenfassung wurden bereits unter [242] veröffentlicht.

7.1 Versuchsaufbauten und Versuchsbeschreibung

Die Versuchsplanung zur In-Prozess-Messung wird in folgende Teilschritte untergliedert:

7.1.1 Abhängigkeit von Honleistenauslenkung und Zustellfrequenz

Zur Ermittlung einer möglichen Frequenzabhängigkeit wird die Honleiste im unverspannten, frei stehenden Zustand für unterschiedliche Signalarten, Frequenzen und Steuerspannungsmplituden ausgelenkt. Zur Auslenkung der Formhonleiste wird ein durch einen Frequenzgenerator erzeugtes Ansteuersignal aufgebracht, wobei dieser an den entsprechenden Analogverstärker des betrachteten Systems Piezoaktor / Formhonleiste angeschlossen wird. Zur Erfassung der radialen Honleistenauslenkung s_a wird ein Triangulationssensor verwendet. Dabei wird das Laserwegmesssystem über einen Magnethalter direkt an der Honspindel befestigt, um die messtechnische Erfassung der maschinenbedingten Eigenschwingungen zu reduzieren. Die Datenerfassung und –auswertung erfolgt dabei über einen externen Messrechner. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung 91 (links) dargestellt. Die ausführlichen Versuchsdaten können Tabelle 12 entnommen werden.

Tabelle 12: Stellsignalparameter zur Ansteuerung der Piezoaktoren

Parametervariation bei der Bestimmung der max. Honleistenauslenkung					
Parameter	Abstufung				
Signalart	Sinussignal		Dreiecksignal		Rechtecksignal
Zustellfrequenzen [Hz]	5	10	15	20	50
Spannungsbereich (min. – max.) [V]	0 - 2	0 - 4	0 - 6	0 - 8	0 - 10
Summe Parameterkombinationen	3 x 5 x 5 = 75 Kombinationen				

7.1.2 Versuchsaufbau und Kalibrierung der Kraftmessleiste

Bei der messtechnischen Erfassung der Honnormalkraft F_N kann in der Literatur zwischen verschiedenen Messmethoden unterschieden werden. Indirekte Messmethoden mittels Piezo-resistiv-Druckaufnehmern oder am Werkstück angebrachten Dehnungs-Messstreifen (DMS) liefern Lee [129] und Yokoyama [270]. Bei der direkten In-Prozess-Messung der Honleisten-normalkräfte werden neben pneumatischen Ansätzen [96] sowie dem Einsatz kapazitiver Drucksensoren [126] auch piezoelektrische Druckkraftsensoren eingesetzt [155, 221, 237, 253, 275]. Für die Erfassung der Honleistennormalkraft beim Formhonen, liefert Wiens [262] einen quasistatischen Versuchsaufbau. Durch die Auslenkung der Honleisten gegen einen piezoelektrischen Druckkraftsensor kann die Honnormalkraft bei stehender Honspindel erfasst und der parallel gemessenen Zustellkraft gegenübergestellt werden.

Zur Fertigung der Kraftmessleiste (siehe Abbildung 90) wird in die DLC-beschichtete Tragleiste eine Sensortasche für einen 1-Komponenten Piezo-Kraftmessringsensor vom Typ 9130B21 [169] der Fa. Kistler erodiert. Zusätzlich wird in die Tragleiste eine Durchgangsbohrung für eine M2,5 Spannschraube eingebracht. Die angrenzende Auflagefläche für die 12 mm lange Kraftmesshonleiste ist in ihren Toleranzen gegenüber dem Kraftsensor zurückgenommen, sodass die Honleiste primär auf dem Kraftmesssensor aufliegt. Die Vorspannung des Kraftmessensors erfolgt durch Verschraubung der Tragleiste mit der Honleiste. Die durch den Kraftnebenschluss erforderliche Kalibrierung der Kraftmessleiste erfolgt gegen einen unter Laborbedingungen kalibrierten Referenzsensor vom Typ Kistler 9313 AA2 [169]. Der Messaufbau ermöglicht die Erfassung von Normalkräften im Bereich von 0 kN bis 3 kN bei einer Nennempfindlichkeit (ohne Kraftnebenschluss) von ca. -3,5 pC/N. Die Ansprechschwelle des nach IP65 geschützten Sensors liegt bei < 0,01 N.

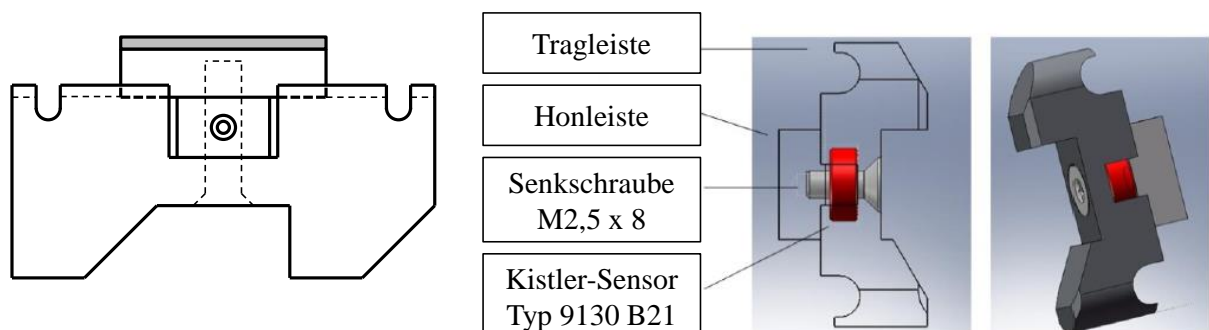
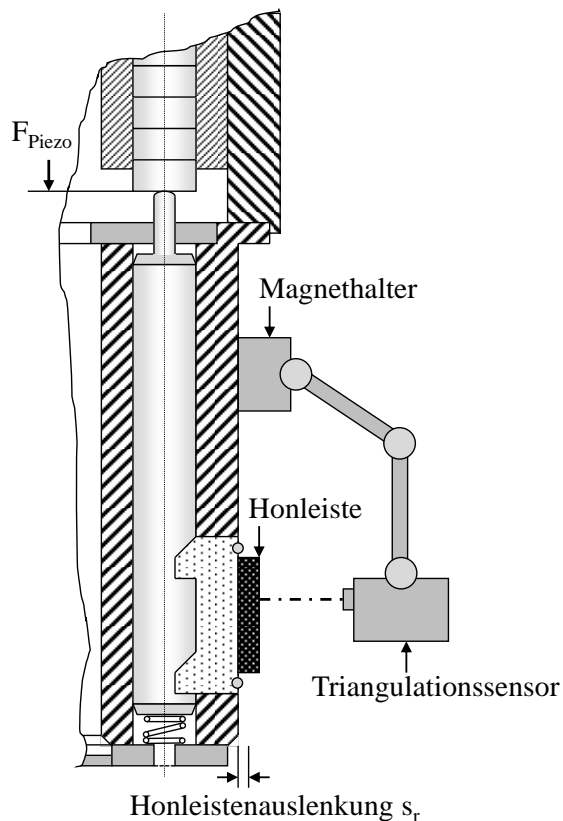


Abbildung 90: Schematische Darstellung der entwickelten Kraftmessleiste [82, 242]

7.1.3 Untersuchung des Übertragungsverhaltens im Werkzeug

Durch die Versuchsreihe zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens im Formhonwerkzeug soll aufgezeigt werden, welche Honleistennormalkräfte in Abhängigkeit des aufgetragenen Stellsignals erzielt werden. Weiterhin können Aussagen hinsichtlich der erzielten Kraftamplitude sowie des Phasenversatzes gegenüber dem Eingangssignal getroffen werden. Neben der Honleistennormalkraft sowie dem Eingangssignal (Ansteuerspannung), kann die piezoelektrische Zustellkraft des Aktors gemessen werden. Entsprechend des Versuchsaufbaus (Abbildung 91, rechts) drückt die Kraftmessleiste gegen einen kalibrierten, feststehenden Referenzsensor. Bei richtig durchgeführter Kalibrierung der Kraftmessleiste zeigen die Messdaten der Kraftmessleiste und des Referenzsensors einen identischen Verlauf. Verstärkt werden die Messsignale mit einem Ladungsverstärker vom Typ Kistler 5015 [169]. Die Spezifikationen der applizierten Piezosensoren sind in Tabelle 13 enthalten.

Versuchsaufbau I:
Werkzeug mit unverspannter Honleiste



Versuchsaufbau II:
Werkzeug mit verspannter Honleiste

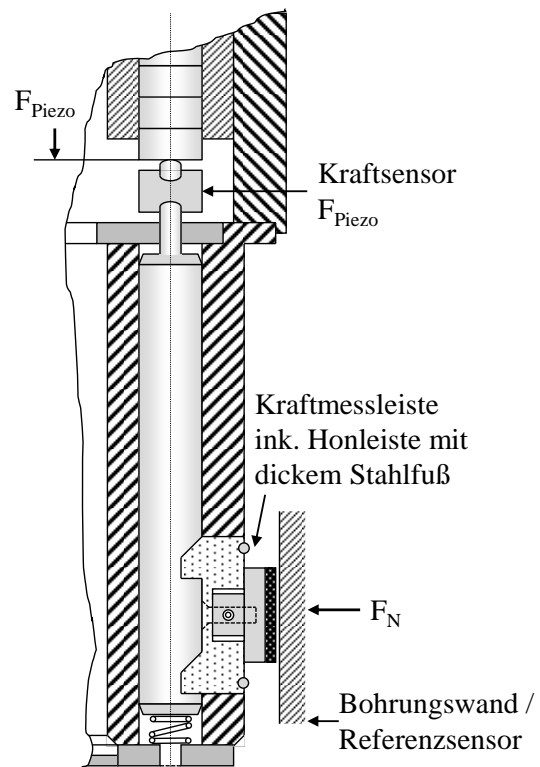


Abbildung 91: Schematische Darstellung der quasistatischen Versuchsaufbauten nach Wiens [262]

Tabelle 13: Spezifikation der verwendeten Piezosensoren zur Ermittlung des Werkzeugverhaltens [169]

Spezifikationen der eingesetzten Piezosensoren			
Bezeichnung	Kistler 9001	Kistler 9130 B21	Kistler 9313 AA2
Gemessene Kraftkomponente	Piezoaktorkraft F_Z	Honnormalkraft F_N	Referenznormalkraft F_{Ref}
Messbereich	0 ... 2 kN	0 ... 3 kN	0 ... 2 kN
Empfindlichkeit	$\approx -3,417 \text{ pC/N}$	$\approx -3,5 \text{ pC/N}$	$\approx -10,18 \text{ pC/N}$

Die quasistatisch verspannten Versuche werden bei ruhender Spindellage durchgeführt. Unterschiedliche Spannungssignale werden in Kombination mit dem nutzbaren Spannungsbe-
reich des Piezoaktors bei unterschiedlichen Frequenzen mit einem Frequenzgenerator erzeugt und über den Analogverstärker zum Piezoaktor geleitet. Der Spannungsarbeitsbereich deckt dabei unterschiedliche Spannungsamplituden und –offsets (Gleichanteil des harmonischen Ansteuersignals) ab. Für eine in vorausgegangenen Formhonuntersuchungen verwendete Spindeldrehzahl von 226,5 U/min, entspricht eine Frequenz von 15,1 Hz des Stellsignals der Bearbeitung einer vierten Fourierordnung (Kleeblatt). Zur Minimierung von werkstückseiti-
gen Steifigkeitseinflüssen, wird bei den Versuchen eine massive Stahlbuchse verwendet. Die-
se Stahlbuchse verfügt weiterhin über eine Aussparung, wodurch mit einem U-förmigen Auf-
bau der Referenzsensor über einen Präzisionsschraubstock gegen die Kraftmessleiste vorge-
spannt werden kann. Die Erfassung und Analyse der Ansteuer- und Kraftsignale erfolgt über
einen Messrechner. Als Schnittstelle zwischen Rechner und Kraftsensor dienen ein Ana-
log/Digital-Wandler sowie ein DAQ-NI 9006 der Firma National Instruments zur Datenerfas-
sung. Die vollständigen Versuchsdaten können Tabelle 14 entnommen werden.

Tabelle 14: Versuchsplan inkl. Parametervariationen der quasistatisch verspannten Versuche

Parametrierung des Ansteuersignals	
Signalart	Sinus, Dreieck, Rechteck
Steuerspannungsbereich [V]	0 – 2, 0 – 4, 0 – 6, 0 – 8, 0 – 10 2 – 4, 2 – 6, 2 – 8, 2 – 10 4 – 6, 4 – 8, 4 – 10 6 – 8, 6 – 10 8 – 10
Signalfrequenz [Hz]	5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 50 Hz
Honmaschinenparameter	
Honleiste	D91; 4,00 x 5,00 x 12,00 x 1,00 4,00 mm Stahlfuß mit M2,5 Gewinde mittig
Spindeldrehzahl n [1/min]	0
Hubgeschwindigkeit v_H [m/min]	0
Anlegekraft Formhonleisten (EMZ-A)	kraftloser Kontakt
Anlegekraft Stützleisten (EMZ-B)	0,8 kN, 1 kN , 1,5 kN, 2 kN (inkl. $F_{RF} \approx 350$ N)
Die Anlegekräfte der Formhon- und Stützleisten werden über die Kraftmesssensoren an den Zustelleinheiten EMZ-A und EMZ-B gemessen.	
Sonstige Einstellparameter	
Abtastfrequenz	1000 Hz
Messzeit	ca. 10 s
Skalierungsfaktor der Messverstärker	200 N/V

7.1.4 Dynamische In-Prozess-Messung der Honnormalkräfte

Für die In-Prozess-Kraftmessung werden drei der vier Schneidleisten mit 20 mm langen Formhonleisten bestückt. Als vierte Schneidleiste wird die in Abbildung 90 vorgestellte Kraftmessleiste verwendet. Für jeden Schneidbelagswechsel erfolgt eine neue Kalibrierung dieser Messleiste. Mit dem in Abbildung 92 dargestellten Messaufbau können Normalkräfte im Bereich von 0 kN bis 3 kN aufgezeichnet werden. Verstärkt werden die Messsignale mit einem Ladungsverstärker vom Typ Kistler MiniAmp 5030A2 (Tabelle 15), wobei das Sensorkabel durch einen Kabelkanal am Formhonwerkzeug entlang geführt wird. Mittels eines speziell für diesen Anwendungsfall gefertigten Schleifrings (Tabelle 15) werden die Messsignale vom Ladungsverstärker zum Messrechner übermittelt.

Tabelle 15: Spezifikationen Schleifring Fa. Rietech und Ladungsverstärker Kistler 5030 A2 [169]

Schleifringübertrager		Ladungsverstärker Kistler 5030 A2	
Spannungsbereich	1 mV ... 500 V	Messbereich	-10.000 ... +10.000 pC
Strombereich	1 mA ... 6 A	Ausgangssignal	-10 ... +10 V
Drehzahl	400 1/min	Schutzart	IP65
Polzahl	13	Drift bei 20°C	< ±0,05 pC/s
Kontaktwerkstoff	Hartgold / Gold	Fehler	< ±1 %
Gehäuse	Aluminium	Abmessungen	38 x 25 x 28 [mm]
Lagerung	2 gedichtete Kugellager	Gewicht	0,03 kg

Neben dem Kraftsignal erfasst der Messrechner das Stellsignal sowie die Hub- und Phasenlage der Honspindel. Bei allen vier Signalen beträgt die Abtastrate 4 ms. Für Spindeldrehzahlen von ca. 230 1/min ermöglicht dies die Erfassung von 65 Messpunkten über den Bohrungsumfang bzw. eine Darstellung einer 9. Fourierordnung mit einem Amplitudenfehler kleiner 5 %. Zusätzlich werden die Honleistennormalkräfte bei der Ergebnisdarstellung zur Auswertung der Flächenpressung p [N/mm²] auf die reguläre Honleistenfläche von 80 mm² bezogen.

Die In-Prozess-Messung der Honleistennormalkraft erfolgt entsprechend der in Kapitel 5.2.1, 5.5.1 und 6.1 dargestellten Bohrungsformen und Versuchsparemeter. Für die zweistufige Glätthonoperation werden lediglich die Korngrößen D30 und D15 eingesetzt. Aufgrund der abweichenden Abmessungen der Kraftmessleiste gegenüber den Formhonleisten und der damit verbundenen Hublängenänderung, erfolgt eine neue Auslegung des Formhonprozesses nach dem Kontaktzeitmodell von Wiens [262]. Die Versuchsparemeter sind in Tabelle 16 enthalten.

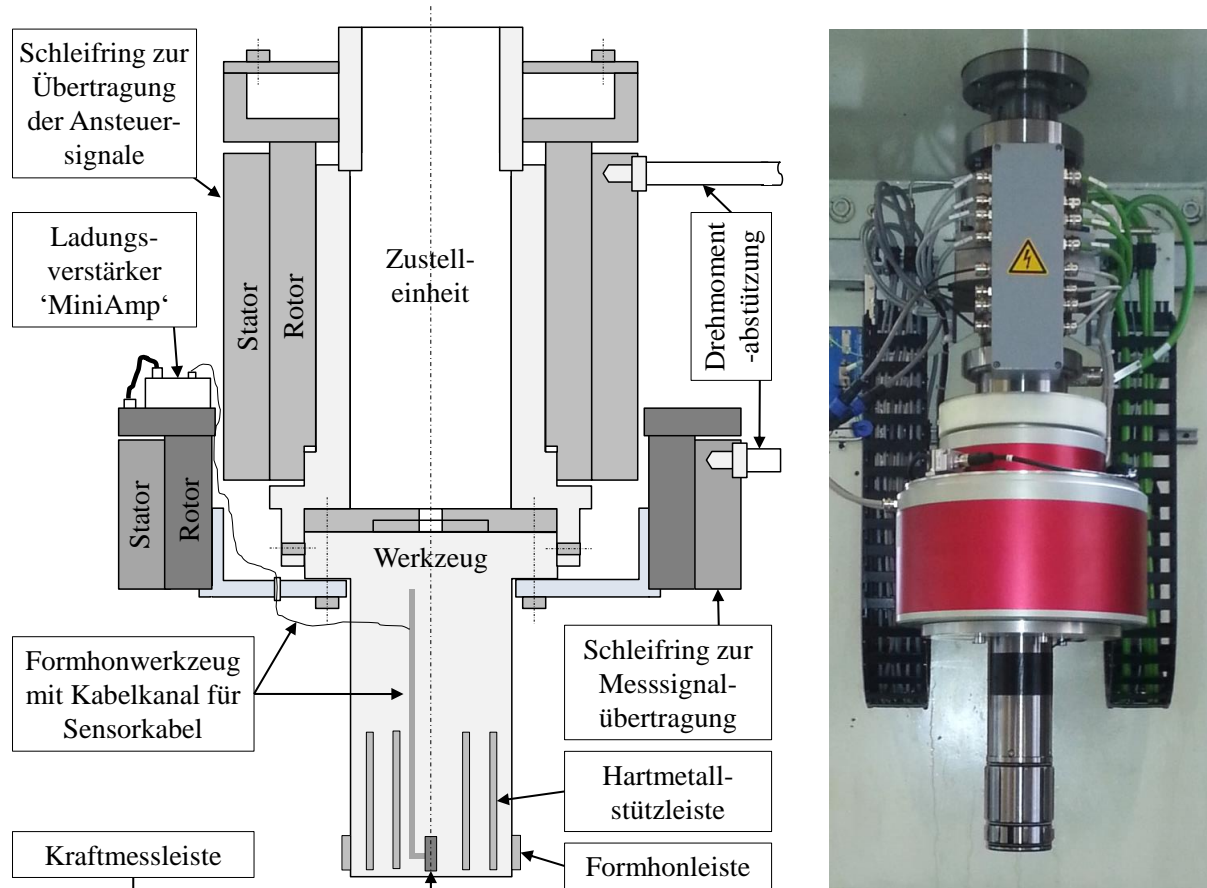


Abbildung 92: Darstellung des Versuchsaufbaus zur In-Prozess-Messung der Honnormalkraft [242]

Tabelle 16: Parameter zur Formhonbearbeitung bei der In-Prozess-Honnormalkraft-Messung

Überdeckungsoptimale Honparameter je Formhonstufe			
Eingangsgrößen		Berechnungsgrößen	
Bohrungsradius r_w [mm]	42	Drehzahl n [1/min]	228,7
Hublänge l_H [mm]	130,2	Honwinkel α berechnet [°]	37
Hubgeschwindigkeit v_H [m/min]	20	Zeit je Doppelhub t_{DH} [s]	0,86
Hubbeschleunigung a_H [m/s ²]	10	Doppelhübe je Überdeckung	5
Zurückgelegter Winkel je Doppelhub $\varphi(t_{DH})$ [°]	1152	Zeit je vollständiger Überdeckung $t_{ÜD}$ [s]	4,3
Sonstige		Anz. vollst. Überdeckungen	10
Honöl: Castrol Honilo 981		Drehrichtungswechsel aktiv	Ja
Anlegewert Formhonleisten	$p_{AN} = 0,91$ MPa	Hondauer je Drehrichtung [s]	21,5
Anlegewert Stützleisten	$p_{AN_{St}} = 0,40$ MPa	Gesamthondauer t_h [s]	43

7.2 Quasistatische Versuche zur Bestimmung der Werkzeugdynamik

Die nachfolgenden quasistatischen Versuche lassen Rückschlüsse auf die mechanische Arbeitsweise der verwendeten piezoelektrischen Werkzeugeinheit zu. Der lastfreie Versuchsaufbau dient der Bestimmung der steuerspannungs- sowie frequenzabhängigen Auslenkung der Formhonleisten. Darüber hinaus ermöglicht der in Abbildung 91 dargestellte verspannte Versuchsaufbau die Bestimmung eines Werkzeugübertragungsfaktors K [262].

7.2.1 Quasistatisch unverspannter Versuchsaufbau

Die in diesem Kapitel diskutierten Messergebnisse zeigen die resultierende Honleistenauslenkung in Abhängigkeit von Steuerspannungssignal, Zustellfrequenz sowie der unverstärkt anliegenden Steuerspannung. Entsprechend der Beobachtungen von Wiens [262] weisen die Wegmessungen ebenfalls einen negativen Auslenkungsnullpunkt der Formhonleisten auf. Aufgrund der vergleichbaren Bauweise der Piezoeinheit besitzt die Begründung einer „montagebedingte(n) Vorspannung der Aktoren in ihrer Aufnahmeeinheit“ [262] weiterhin ihre Gültigkeit.

Die in Abbildung 93 (links) dargestellte Weg-Spannungs-Hysterese sinusoidaler Steuerspannungssignale bei einer Frequenz von 10 Hz zeigt, dass sich die Nullpunkte der einzelnen Auslenkungszyklen entlang der Abszisse verschieben. Diese Verschiebung der Nullpunktlage ist im Großsignalbetrieb der Piezokeramiken begründet [103, 164]. In Abhängigkeit der an die ferroelektrischen Piezoaktoren angelegten Spannung tritt bei der Hysterese eine remanente Polarisierung auf, welche eine Restauslenkung der Stapelaktoren trotz zeitgleicher Nullspannung bedingt. Dieser Effekt führt daher zu einem nichtidealen Übertragungsverhalten und muss bei der Auslegung des späteren Honprozesses berücksichtigt werden.

(Anmerkung: Die in Abbildung 93 gezeigte Honleistenauslenkung ist um den negativen Anteil bereinigt. Das globale Minimum wurde hierbei auf den Wert Null gesetzt. Die spannungsabhängige Nullpunktverschiebung bleibt hiervon unberührt. Ein Auslenkungszyklus soll als Abfolge einer Honleistenauslenkung ausgehend vom Auslenkungsnullpunkt sowie deren vollständiger Rückstellung verstanden werden.)

Das in Abbildung 93 rechts angeordnete Diagramm zeigt die Frequenzabhängigkeit der Honleistenauslenkung s_a für diverse sinusförmige Steuerspannungsamplituden. Die maximale Honleistenauslenkung bei gegebener Sinusschwingung und einem Steuerspannungsbereich von 0 V bis 10 V beträgt 162,6 μm bei einer Frequenz von 5 Hz. Es zeigt sich weiterhin, dass die maximale Honleistenauslenkung unabhängig vom gewählten Steuerspannungsintervall mit

zunehmender Frequenz sinkt. Dies kann durch die Trägheit des Systems bedingt durch mechanische Reibverluste sowie die größere relative Steuerspannungsänderung je Zeiteinheit bei steigender Frequenz erklärt werden. Die frequenzabhängige Änderung der Honleistenauslenkung folgt dabei einem linearen Trend. Ausgenommen von diesem linearen Trendverlauf ist das Steuerspannungsintervall 0 V bis 10 V ab Zustellfrequenzen größer 30 Hz.

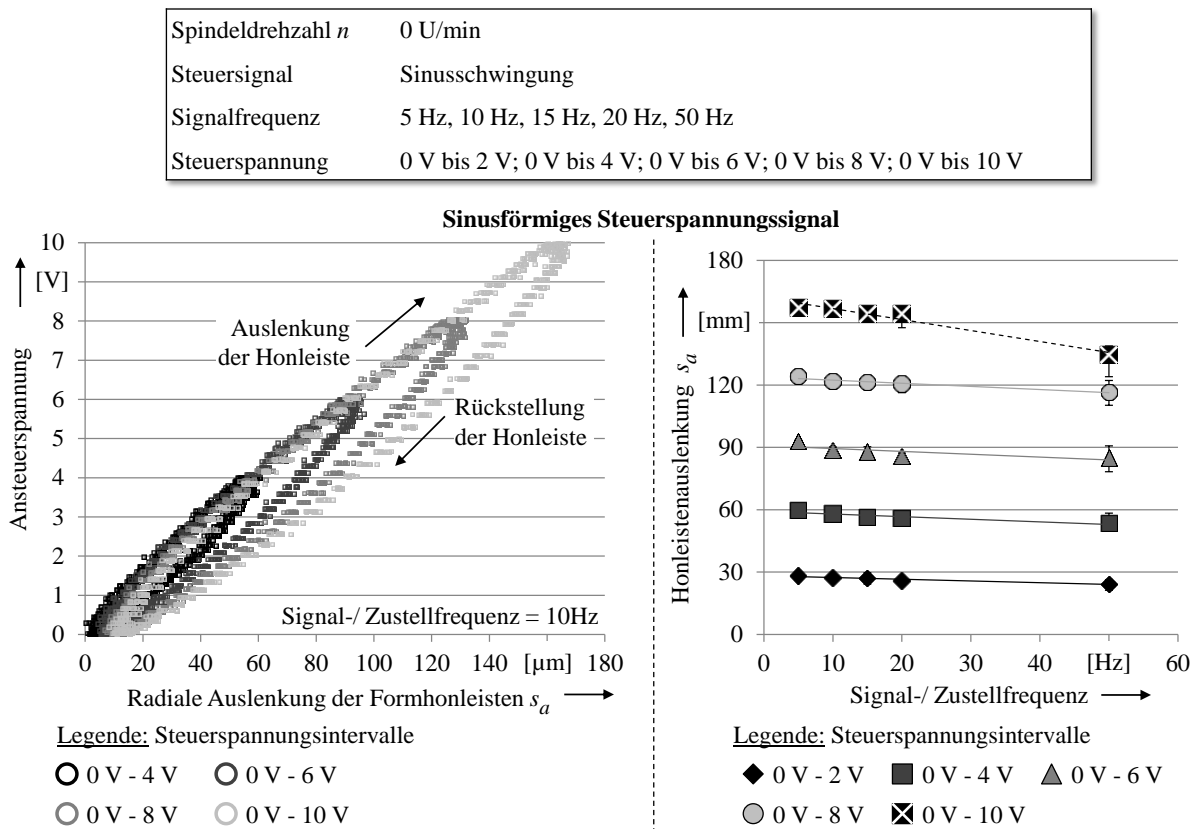


Abbildung 93: Weg-Spannungs-Hysterese der Formhonleisten bei 10 Hz (links); maximale Honleisten-auslenkung in Abhängigkeit von Steuerspannungsintervall bzw. Signalamplitude (rechts)

Abbildung 94 zeigt die maximale Honleistenauslenkung in Abhängigkeit eines dreieck- und rechteckförmigen Steuerspannungsintervalls. Wie bei der Analyse der sinusoidalen Steuerspannung zeigt sich für die Zustellfrequenzen 5 Hz bis 20 Hz ein linearer Anstieg der Honleistenauslenkung bezogen auf die Amplitude des Steuerspannungssignals. Unterschiede zwischen den drei Signalarten zeigen sich vor allem in den Auslenkungsmaxima für die einzelnen Steuerspannungsintervalle. Für das rechteckförmige Spannungssignal werden die größten Honleistenauslenkungen s_a ermittelt, gefolgt von denen des sinus- (-3,2 % gegenüber Rechteckspannung) und dreieckförmigen (-7,75 % gegenüber Rechteckspannung) Steuersignals. Der lineare Trend der frequenzabhängigen Änderung der maximalen Honleistenauslenkung kann zudem für dreieck- und rechteckförmige Steuerspannungssignale bestätigt werden. Ausnahmen gelten analog denen des sinusoiden Ansteuersignals.

Spindeldrehzahl n	0 U/min
Steuersignal	Dreieckschwingung, Rechteckschwingung
Signalfrequenz	5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 50 Hz
Steuerspannung	0 V bis 2 V; 0 V bis 4 V; 0 V bis 6 V; 0 V bis 8 V; 0 V bis 10 V

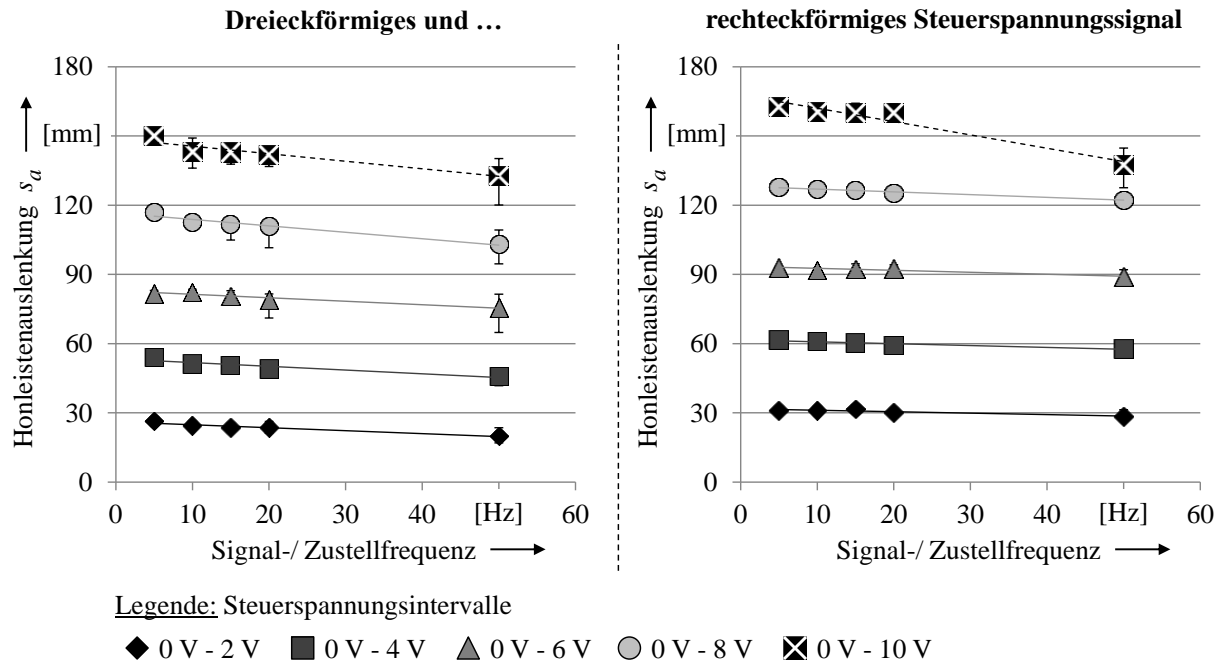


Abbildung 94: Maximale Honleistenauslenkung in Abhängigkeit eines dreieck- (links) bzw. rechteckförmigen (rechts) Steuerspannungsintervalls

Eine Sonderrolle in der Betrachtung nimmt die Analyse einer frequenzabhängigen Honleistenauslenkung bei Nutzung des vollen Spannungsbereichs dar. Die in Abbildung 95 dargestellten Messergebnisse zeigen, dass die maximale Auslenkung der Formhonleisten mit wachsender Zustellfrequenz exponentiell abfällt. Einerseits ist dies der Trägheit des Systems geschuldet, andererseits liefert der Analogverstärker oberhalb einer Grenzfrequenz von ca. 30 Hz keine konstante Verstärkung der Ansteuersignale mehr [262]. Dies führt zu dem Schluss, dass grundsätzlich ein exponentieller Zusammenhang zwischen der Honleistenauslenkung und der Stellfrequenz besteht, dessen Einfluss jedoch in Abhängigkeit der Signalart sowie des Steuerspannungsintervalls erst bei unterschiedlichen Schwellwerten (Frequenzen) deutlich wird. Gleichzeitig spielt diese lokalisierte Frequenzabhängigkeit bei der Formhonbearbeitung eine eher untergeordnete Rolle, da das absolute Delta der Honleistenauslenkung im tatsächlich verwendeten Frequenzbereich von 0 Hz bis 30 Hz lediglich wenige Mikrometer beträgt. Eine Zustellfrequenz von 30 Hz entspricht bei einer gängigen Spindeldrehzahl von 225 min^{-1} dabei der Bearbeitung einer achten Fourierordnung.

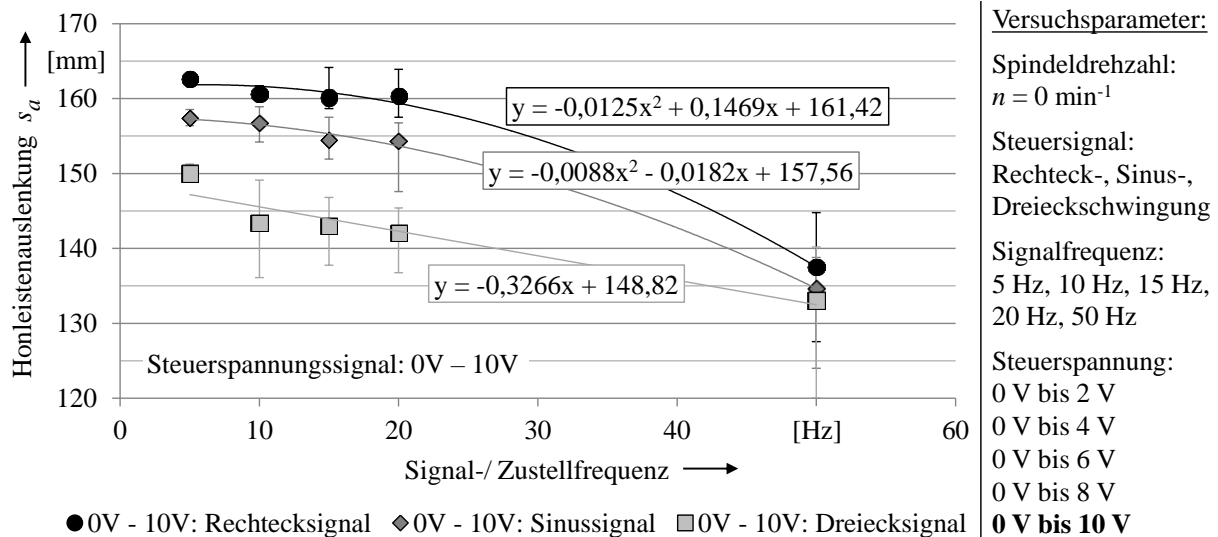


Abbildung 95: Maximale Honleistenauslenkung in Abhängigkeit des Steuerspannungssignals

7.2.2 Quasistatisch verspannter Versuchsaufbau

Entsprechend dem in Abbildung 91 (rechts) dargestellten Versuchsaufbau wird die kalibrierte Kraftmessleiste gegen die Bohrungswand kontaktiert. Die gemessene Vorspannung der Honleiste ist dabei so gering, dass sie mit 0 MPa angenommen werden kann. Dadurch wird die gemessene Honleistennormalkraft F_N einzig durch die Aktorik erzeugt. Ein durch die Grobzustellung zusätzlich erzeugter homogener Kraftoffset beeinflusst somit auch nicht die Berechnung des bei Wiens [262] definierten Werkzeugübertragungsfaktors K als Quotient aus Normalkraft F_N und der Zustellkraft des Stapelaktors F_Z . Um den werkstückseitigen Einfluss auf die quasistatischen Kraftmessergebnisse sowie die Ermittlung des werkzeugspezifischen Übertragungsverhaltens weitestgehend zu eliminieren, erfolgen die Versuche in einer dickwandigen, zweiteiligen Stahlbuchse. Zur Anpassung der Messbuchse an verschiedene Honwerkzeugdurchmesser wird eine Innenbuchse mit Zugangsschlitz für die Kraftmessleiste verwendet. Die Stützleisten des Honwerkzeugs werden gegen die Wand der Futterbuchse angelegt, sodass das Honwerkzeug entsprechend positioniert werden kann. Bei den in der vorliegenden Arbeit diskutierten Versuchen beträgt der Durchmesser der innenliegenden geschlitzten Buchse 82 mm bei einer Stegbreite von 20 mm. Die Außenbuchse weist eine Wandstärke von 22 mm auf.

In Abbildung 96 sind die gemessenen Kraftsignale (Zustellkraft des Piezoaktorstapels F_Z , Honleistennormalkraft F_N , Normalkraft des Referenzsensors F_{Ref}) sowie das unverstärkte Steuerspannungssignal U_{Ein} (Eingangsspannung) über der Zeit für Sinus-, Dreieck- und Rechteckschwingungen dargestellt. Die Darstellung erfolgt dabei exemplarisch für eine Zu-

stellfrequenz von 15 Hz im Steuerspannungsbereich von 0 V bis 10 V, was bei einer Spindeldrehzahl von 225 min^{-1} der Bearbeitung einer Harmonischen vierter Ordnung entspricht.

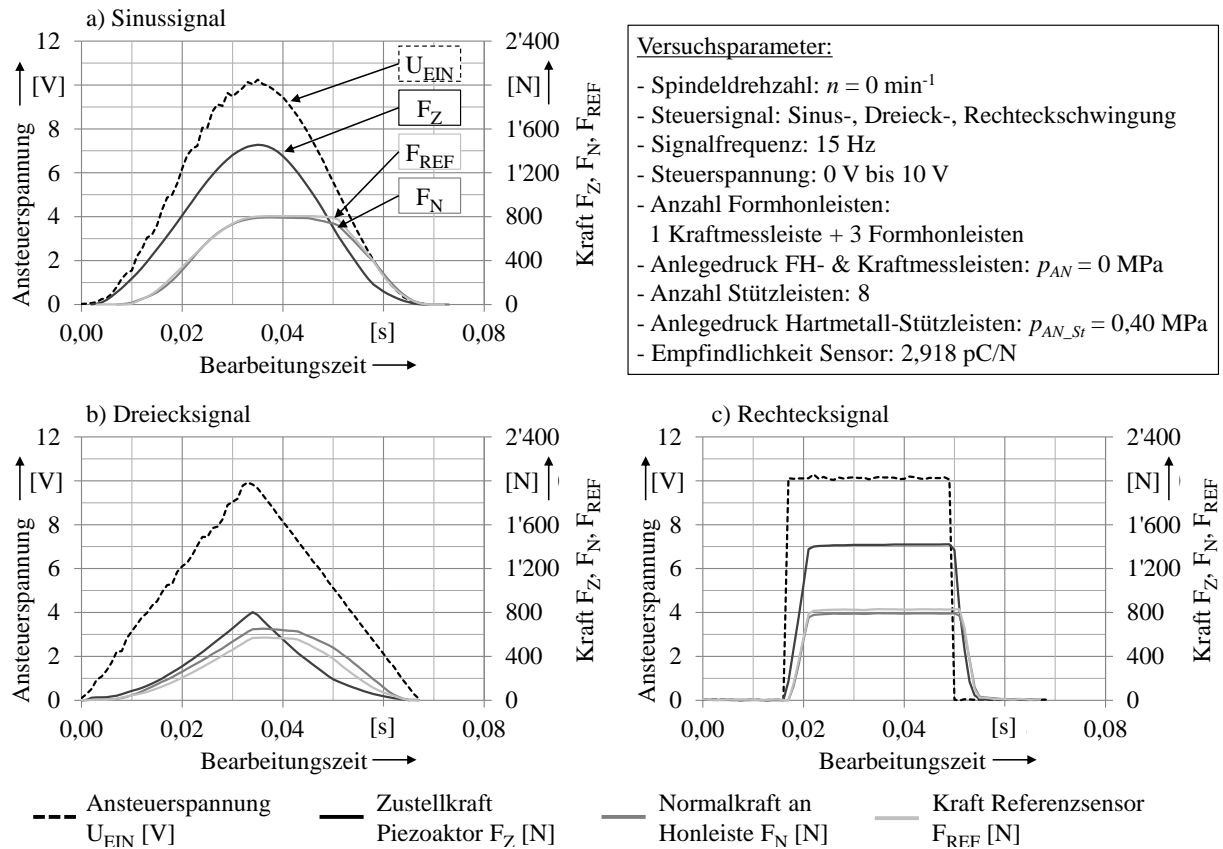


Abbildung 96: Einfluss der Signalart der Steuerspannung auf den resultierenden Normalkraftverlauf

Die Analyse der Kraftmessungen (Abbildung 96) zeigt für die Normalkraftkennlinien der Kraftmessleiste sowie des unter Laborbedingungen kalibrierten Referenzsensors vergleichbare Werte. Allerdings können im Normalkraftverlauf für alle Signalarten deutliche Phasenverschiebungen gegenüber der Eingangsspannung beobachtet werden. In der Zustellphase sind diese auf die nicht ideale mechanische Übertragung der Piezozustellkraft zurückzuführen. Die im Formhonwerkzeug auftretenden mechanischen Reibvorgänge beeinflussen weiterhin in Kombination mit der Steifigkeit des Formhonwerkzeugs sowie der indirekten Honleistenrückstellung die Plateauausbildung des Normalkraftsignals bei einer angelegten Steuerspannung. Als bedeutendste Reibvorgänge gelten dabei die Reibpaarungen Werkzeugkörper / Zustellstange sowie Zustellstange / Tragleiste. Diese passive Leistenrückstellung mittels der radialen Umlauffedern führt weiterhin zu einer reibungsbedingten Verzögerung im Normkraftabfall in der Phase der Honleistenrückstellung, was in einem Phasenversatz des Normkraftverlaufs resultiert.

Im Hinblick auf die Verläufe der piezoelektrischen Zustellkräfte (Abbildung 96) wird deutlich, dass diese ebenso wie der auch hier erkennbare Phasenversatz von der Art der Steuerungspannung abhängig sind. Dies bestätigt die in [262] getroffene Behauptung einer Abhängigkeit des Phasenversatzes von der zu honenden Sollform. Weiterhin zeigen die Analysen der Kraftverläufe, die dynamische Komplexität der Dreieck- und Rechteckspannung. Gerade die Rechteckspannung als Sprungfunktion zeigt, dass solche Sollformvorgaben durch das bestehende Formhonsystem nicht dargestellt werden können. Die Kurvenverläufe der Ein- und Ausschwingphasen der Honleisten sind dabei das Resultat der mechanischen Reibvorgänge im Zustell- und Konussystem sowie der Werkzeugsteifigkeit.

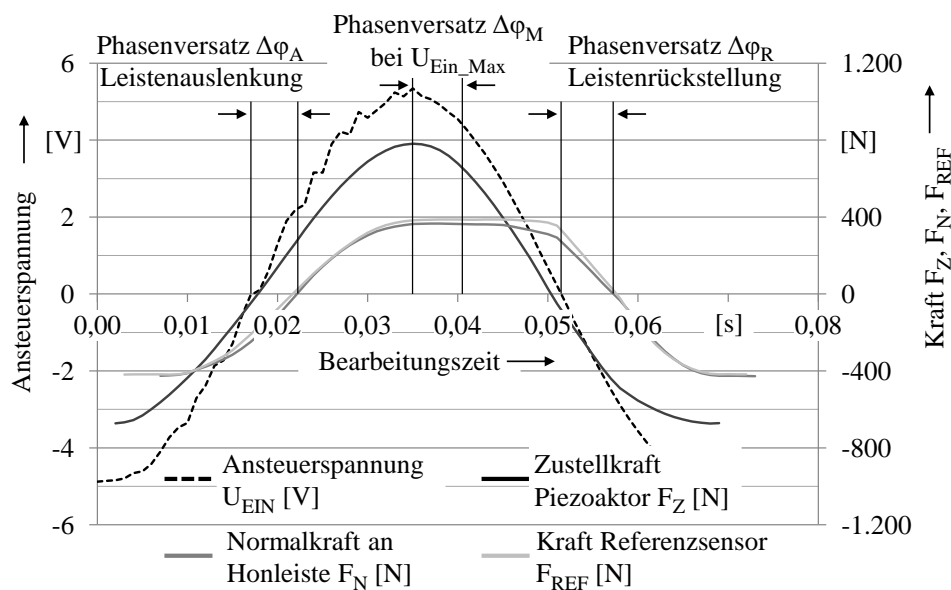


Abbildung 97: Ermittlung des Phasenversatzes zwischen Steuersignal und resultierender Honnormalkraft F_N

Der bereits angesprochene Phasenversatz ist für die Prozesssteuerung des Formenhonens von entscheidender Bedeutung, da dieser die Formgenauigkeit der gehonten Bohrung und damit die Wirksamkeit der Bearbeitung maßgeblich beeinflusst. In Abbildung 97 wird daher die in dieser Arbeit angewandte Auswertemethodik zur Ermittlung des Phasenversatzes zwischen Eingangssignal und Normalkraftverlauf erklärt. Die Messkurven werden dabei entlang der Spannungsachse so verschoben, dass die Abszisse eine Mittelwertlinie der einzelnen Signale darstellt. Die daraus auswertbaren Nullstellen und lokalen Maxima dienen nach einer Differenzbildung der Darstellung des Phasenversatzes in den Phasen der Honleistenzu- und -rückstellung sowie zur Zeit der maximal anliegenden Steuerungspannung bzw. Normalkraft. Die Nullstellen entsprechen dabei näherungsweise den Wendepunkten der Messkurven.

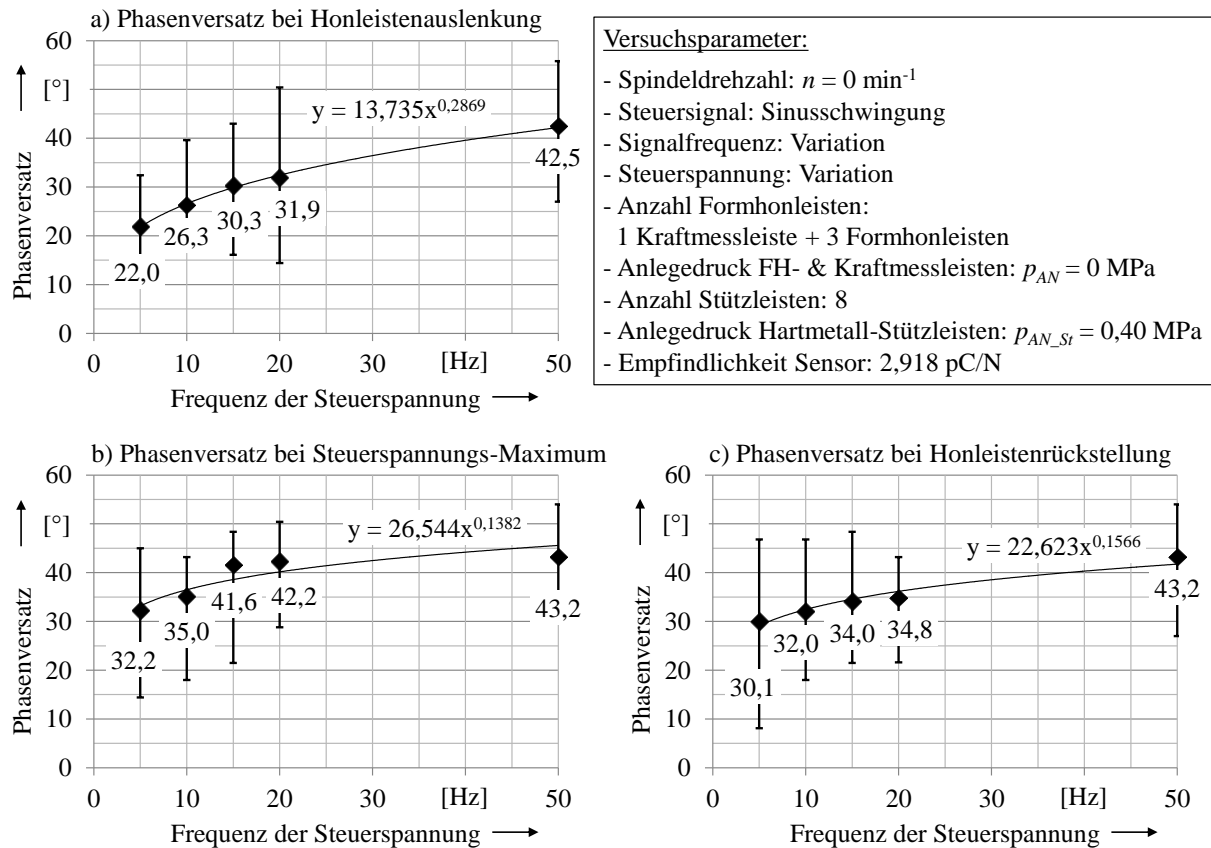


Abbildung 98: Phasenversatzes zwischen Steuersignal und Honnormalkraft in Abhängigkeit der Zustellfrequenz

Die Auswertung des Phasenversatzes $\Delta\varphi$ in Abhängigkeit der Zustellfrequenz zeigt Abbildung 98. Der Phasenversatz $\Delta\varphi$ [°] zwischen Zustell- und Kraftsignal bezieht sich dabei auf eine vollständige Schwingung ($\equiv 360^\circ$). Eine vollständige Schwingung ist dabei definiert als Zeitintervall eines Honleisten auslenk- und Honleistenrückstellvorgangs. Die Umrechnung des Signalversatzes von [s] in [°] erfolgt über die Signalfrequenz. Dargestellt sind die Ergebnisse exemplarisch für Sinusschwingungen. Für die Zeitpunkte „Honleisten zustellung“ (a), „lokales Maximum“ (b) und „Honleistenrückstellung“ (c) können unterschiedliche Phasenverschiebungen ermittelt werden. Die Honleisten zustellung bzw. der resultierende Normalkraftaufbau erfolgt verglichen mit der Leistenrückstellung leicht dynamischer. Generell liefert die Auswertung der Normalkraftverläufe in Abhängigkeit von Signalart, -frequenz, -amplitude und -mittelspannung trotz DLC-beschichteter Werkzeugbestandteile Phasenverschiebungen gegenüber der Eingangsspannung von ca. 10° bis 55° . Zum Ausgleich des Phasenfehlers führt die Implementierung eines Vorhaltewinkels von ca. 30° (Mittelwert für die Zustellfrequenz 15 Hz) je Spindeldrehrichtung zu einer Verbesserung der Formgenauigkeit im Formhonbetrieb [262]. Allerdings erfordert die breite Streuung der Winkelfehler dennoch eine iterative Einrichtung des Formhonprozesses. Die Anzahl der Iterationsschleifen kann durch die erwähnte Maßnahme (Vorhaltewinkel) allerdings reduziert werden.

Neben der Analyse des resultierenden Phasenversatzes dient der bei Wiens [262] definierte Werkzeugübertragungsfaktor K als Quotient aus Normalkraft F_N und Piezozustellkraft F_Z zur Beurteilung der Werkzeuffizienz bzw. der werkzeuginneren Reibung (indirekt). Schmid und Bergan [233] definieren diesen Quotient ebenfalls als Funktion der Honleistenbewegung, des Konuswinkels sowie des Reibwertes.

$$K = F_N / F_Z \quad (30)$$

Analog zu Wiens [262] stellt der Werkzeugübertragungsfaktor keine Funktion über dem Zeitvektor t dar, sondern berechnet sich aus den jeweilig ermittelten Maximalwerten der Kraftsignale F_N und F_Z .

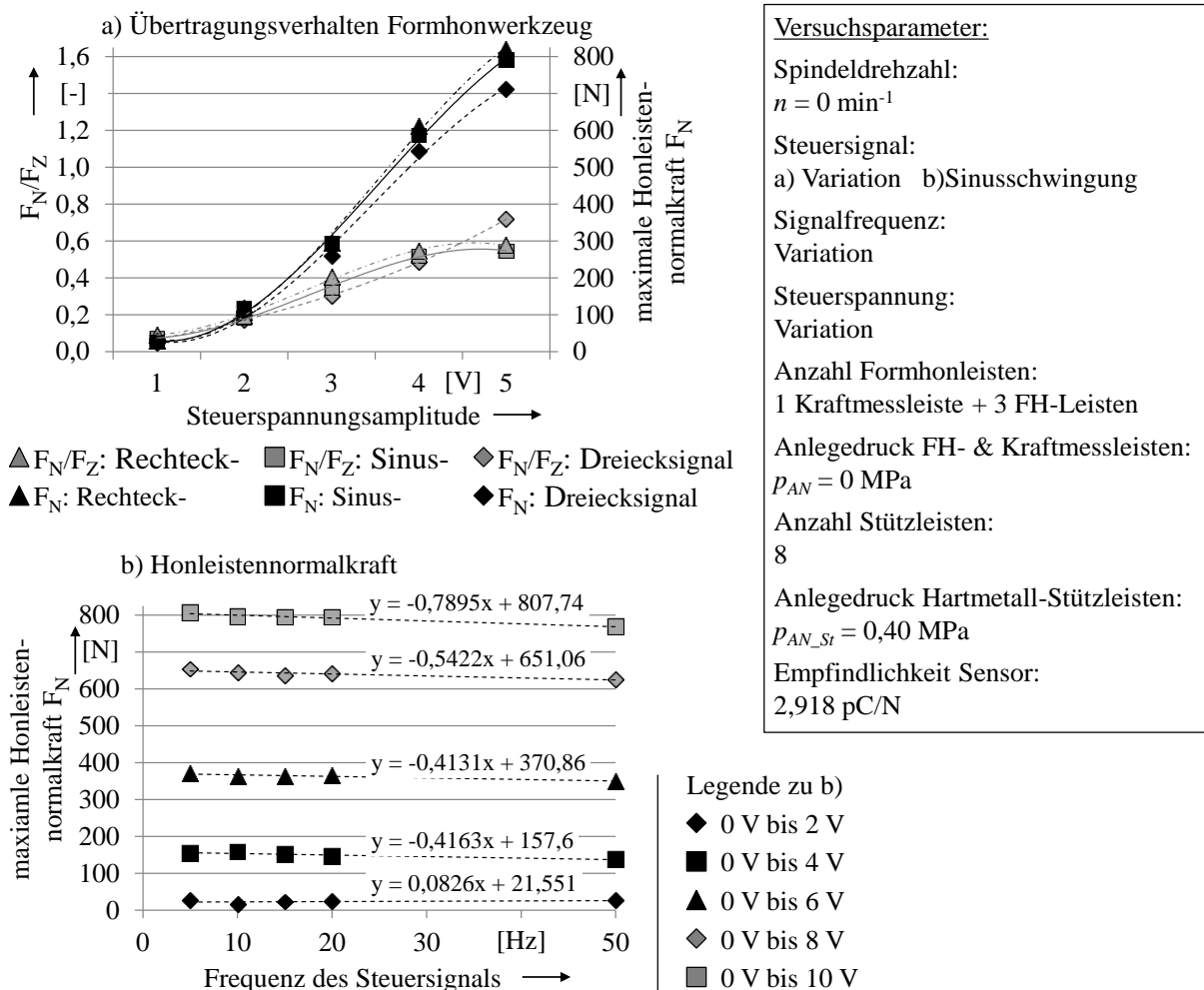


Abbildung 99: Übertragungsverhalten des Formhonwerkzeugs für sinusoidale Steuerspannungen

In Abbildung 99 (a) zeigt sich eine Abhängigkeit des Werkzeugübertragungsfaktors K von der Steuerspannungsamplitude sowie der Signalart (Sinus-, Dreieck- oder Rechtecksignal). Die Kennwertkurve sowie die ebenfalls dargestellten Honleistennormalkräfte besitzen eine S-förmige Kurvenform (im quasistatisch verspannten Versuch). Im unteren Steuerspannungsbe-

reich ($U_{Ein} < 2 \text{ V}$) kann die geringe Kraftdifferenzierung durch die niedrige Aktorauslenkung sowie die notwendige Überschreitung der Ansprechschwelle begründet werden. Die Zunahme der Werkzeugeffizienz bei steigender Steuerspannungsamplitude ist darauf zurückzuführen, dass die Honleistennormalkraft im Vergleich zur Piezozustellkraft überproportional ansteigt. Die Honleistennormalkraft weist zudem im Steuerspannungsbereich von ca. 2 V bis 8 V eine große Differenzierung der resultierenden Normalkraft auf. Gleichzeitig kann für sie – analog zur Messung der Honleistenauslenkung s_a – eine mit steigender Steuerspannungsamplitude zunehmende lineare Frequenzabhängigkeit ermittelt werden (siehe Abbildung 99 (b)).

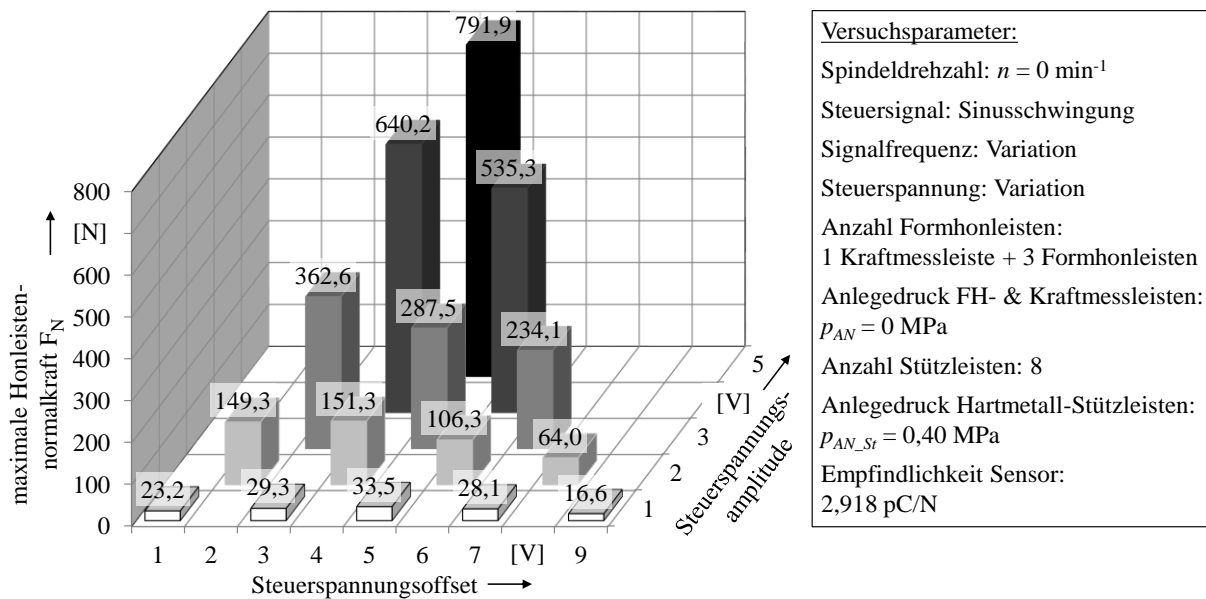


Abbildung 100: Honleistennormalkraft in Abhängigkeit von Steuerspannungsamplitude und Mittelspannung

Weiterhin zeigt Abbildung 100 eine Abhängigkeit der gemessenen Honnormalkraft F_N vom Mittelwert der Steuerspannung. Mit steigendem Spannungsoffset steigt bei der Formhonbearbeitung der zerspannte Gleichanteil („Verlустаufmaß Δd_V) bei verhältnismäßig kleineren Normalkraftamplituden. Dieser Effekt wird dabei durch zwei Phänomene begünstigt. Einerseits liegt die zuvor beschriebene, geringe Graduierungsmöglichkeit der Honleistennormalkraft im oberen Spannungsbereich vor, andererseits erhöht sich durch den hohen homogenen Kraftanteil der Piezozustellung die werkzeuginnere Reibung, was zu einer verhältnismäßig geringeren Kraftübertragung führt.

7.2.3 Einfluss des Stützleistenanpressdrucks auf die Werkzeugdynamik

Als ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor auf die Werkzeugdynamik kann der Anpressdruck der Hartmetall-Stützleisten angenommen werden. Die Aufgabe der Stützleisten besteht unter anderem darin, die aus der Honleistenzustellung resultierenden Reaktionskräfte aufzunehmen. Abbildung 101 zeigt die Untersuchungsergebnisse zur Messung der Honleistenormalkraft in Abhängigkeit des Stützleistenanpressdrucks. Insgesamt werden drei Messaufbauten unterschieden. Bei Variante 1 (V1) wird neben den Stützleisten lediglich der Platz der Kraftmessleiste bestückt, deren Normalkräfte bei stehender Spindel für eine Sinusschwingung (0 V bis 10 V bei 5 Hz) mit einer Abtastrate von 0,001 s erfasst werden. Im Versuchsaufbau V2 wird zusätzlich zur Kraftmessleiste der um 180° versetzte Formhonleistenplatz bestückt. Variante 3 unterscheidet sich dahingehend von Variante 2, dass die Kraftmessleiste die Reaktionskräfte der gegenüberliegenden Formhonleiste erfasst.

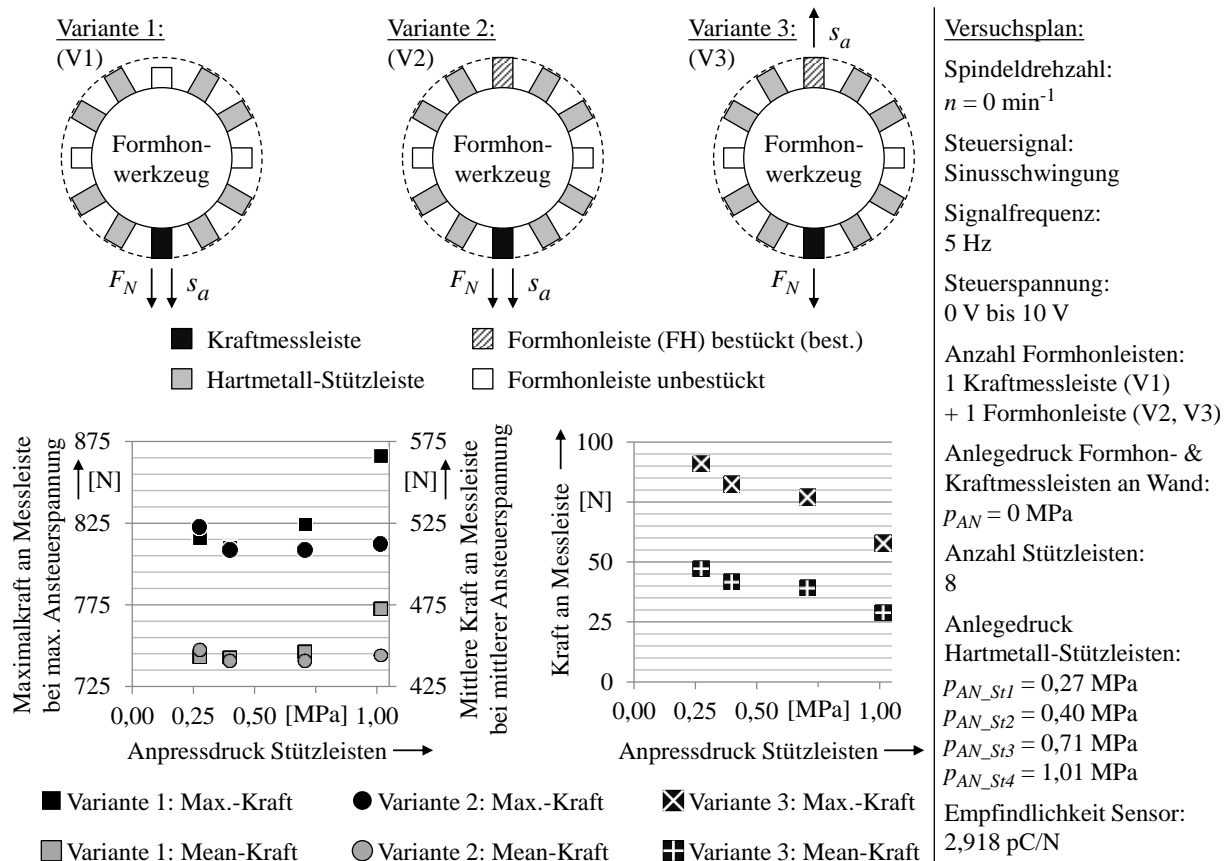


Abbildung 101: Einfluss des Stützleistenanpressdrucks auf die Werkzeugdynamik

Für Variante 1 zeigt sich, dass die aufgebrachte Normalkraft (maximaler und mittlerer Honleistenanpressdruck) mit zunehmender Stützleistenvorspannung steigt. Dieser Effekt ist auf die geringere Beweglichkeit der Honspindel aufgrund der verbesserten Abstützwirkung zurückzuführen. Im Gegensatz hierzu zeigt sich bei Variante 2 keine eindeutige Beeinflussung der Normalkraft durch den Stützleistenanpressdruck. Dies lässt zwei mögliche Schlussfolge-

rungen zu. Zum einen könnten die Reaktionskräfte an der (der Kraftmessleiste) gegenüberliegenden Formhonleiste trotz einer Erhöhung des Stützleistenanpressdrucks ansteigen. Andererseits werden die Reaktionskräfte möglicherweise durch die symmetrische Leistenanordnung besser in die Stützleisten abgeleitet. Erstere Vermutung kann durch die Messergebnisse von Variante 3 widerlegt werden, da die Reaktionskräfte mit steigender Stützleistenvorspannung abnehmen. Um eine gute Abstützwirkung des Formhonwerkzeugs bei möglichst geringer Einflussnahme auf das Honergebnis zu erzielen, wird ein Stützleistenanpressdruck von ca. 0,40 MPa empfohlen. Diese Erkenntnis basiert auf den in Abbildung 101 rechts dargestellten Reaktionskräften an der Kraftmessleiste bei gleichzeitiger Auslenkung / Ansteuerung der um 180° versetzten Formhonleiste. Der Kurvenverlauf zeigt, dass die maximalen Reaktionskräfte F_N ab einem Stützleistenanpressdruck von $p_{AN} \geq 0,4$ MPa unter 80 N bzw. 1 MPa sinken. Der Einfluss der Reaktionskräfte auf die Bohrungsform kann daher als gering angenommen werden.

7.3 In-Prozess-Messung der Honleistennormalkräfte

Durch den in Kapitel 7.1 beschriebenen Versuchsaufbau können erstmalig die Honleistennormalkräfte während des laufenden Honprozesses messtechnisch erfasst werden. Die hierfür notwendigen Voruntersuchungen sowie die Ermittlung des nichtlinearen Übertragungsverhaltens der Zustell- und Werkzeugeinheit wurden bereits ausführlich in Kapitel 7.2.2 diskutiert. Zusätzlich erfolgte im Vorfeld der Inlinemessungen eine Versuchsreihe zur Ermittlung des Einflusses der Querkräfte auf die Normalkraftmessung. Die von der Zustellkraft, Spindeldrehzahl und Reibkraft zwischen Honleiste und Zylinderwand abhängigen Querkräfte (Tangentialkräfte) können durch den bauraumbedingt verwendeten Einkomponentensensor nicht erfasst werden. Das Versuchsergebnis zeigt, dass ab einer Tangentialkraft von ca. 200 N eine zunehmende Beeinflussung der Honnormalkraft resultiert. Diese ist auf ein Kippen der Kraftmesshonleiste zurückzuführen. Da die Tangentialkräfte beim Honen erfahrungsgemäß deutlich kleiner sind als die Normalkräfte, kann der Einfluss der Querkräfte auf die Normalkraftmessung als gering bewertet werden. Um künftig ein besseres Prozessverständnis zu entwickeln ist es unerlässlich, dass diese Kräfte in jeder Formhonstufe für die verwendeten Schneidmittel erfasst werden. Die Messungen liefern Hinweise bezüglich deren Auswirkung auf das Formhonergebnis. Kapitel 7.3.1 zeigt und diskutiert dabei die In-Prozess Kraftmessergebnisse zu Kapitel 5.2, in Kapitel 7.3.2 werden die Kraftmessergebnisse entsprechend der Schneidmittelstudie (Kapitel 6.2) erläutert.

7.3.1 Messung der Honleistennormalkraft unter Verwendung des Ist-Standes

Beim Übertrag des Ist-Stands auf thermische Spritzschichten (siehe Kapitel 5.2) konnte nachgewiesen werden, dass die beim Formhonen zu Bearbeitungsbeginn teils sehr hohen Honleistennormalkräfte die zu honende thermische Spritzschicht so stark schädigen können, dass die gewünschte Oberflächentopographie (z. B. aufgrund von Lamellenausbrüchen) in den nachfolgenden Honstufen nicht mehr einstellbar ist [47, 242]. Die Ursache ist dabei in der Gestaltung des Formhonprozesses zu begründen. Der spannungs- bzw. weggesteuerte Referenzprozess führt bei Bearbeitungsbeginn zu teilweise sehr hohen Honleistennormalkräften, welche über der Honzeit abfallen (siehe Abbildung 102). Für eine zylindrische Sollformvorgabe ist die Abnahme der mittleren Flächenpressung abhängig von der Nachstellschrittweite der Grobzustellung, der anliegenden Steuerspannung sowie der verwendeten Korngröße.

Abbildung 102 zeigt die gemessenen Flächenpressungen in Abhängigkeit von Steuerspannung und Hondauer für den ersten Formhonprozessschritt (Schneidmittel D172). Aufgrund der zeitlich konstanten Ansteuerspannungen liegen zu Bearbeitungsbeginn Flächenpressungen bis

> 12 MPa an. Davon entfallen entsprechend Kapitel 7.2.2 ca. 10 MPa auf die Aktorkraft und ca. 0,9 MPa auf die Anlegekraft der Formhonleisten. Trotz konstanter Steuerspannungen streuen die Normalkräfte sehr stark um den jeweiligen Mittelwert. Diese Schwankungen können auf strukturdynamische Bauteileinflüsse, Reibungs- und Steifigkeitseinflüsse an Werkzeug und Zustelleinheit sowie die Bohrungsgeometrie (Konizität, Unrundheit) zurückgeführt werden. Weiterhin sinken die Abweichungen vom Mittelwert der Honnormalkraft mit zunehmender Hondauer sowie abnehmender Steuerspannung. Trotz unterschiedlicher Ansteuerung nähern sich die mittleren Prozesskräfte in einem hyperbolischen Kurvenverlauf einem ähnlichen Wertebereich von ca. 2,0 MPa bis 2,7 MPa nach der Honzeit $t_h = 42,5$ s an.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Zeitl. Skalierung	Nein
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 21,25 s	Drehrichtung FH1	Re / Li
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honleisten FH1	D172	Drehrichtung FH2	Re / Li
Wechsellauf aktiv	ja	Honleisten FH2	D35	Kühlschmierstoff	Honöl

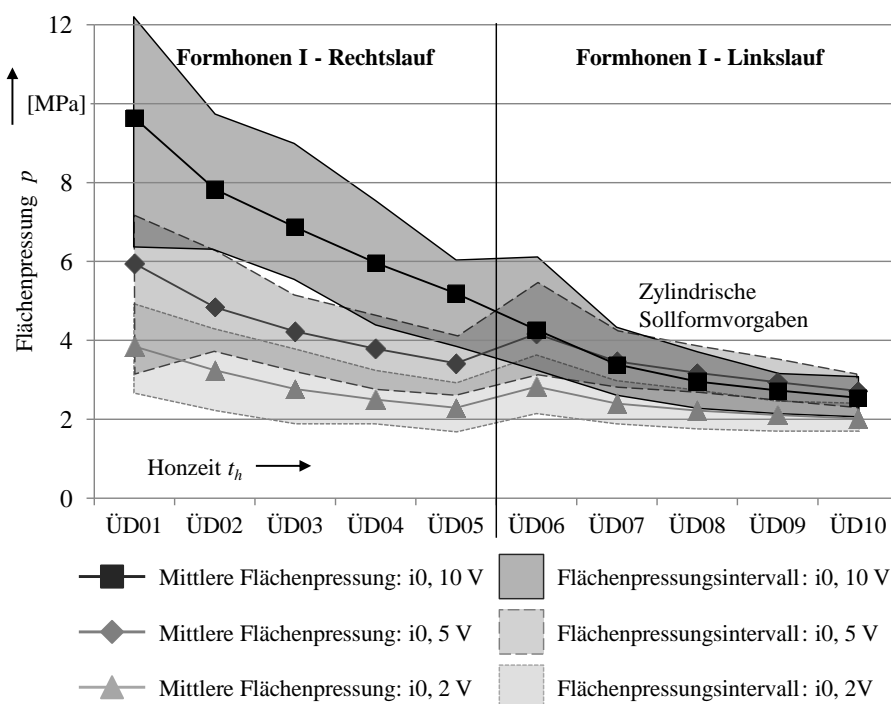


Abbildung 102: Mittlere Flächenpressung in Abhängigkeit von Steuerspannung und Hondauer für D172

Für den Prozessschritt Formhonen II zeigen die gemessenen Flächenpressungen einen etwas differierenden Verlauf bezogen auf den vorhergehenden Prozessschritt. Eine Abstufung der Normkraftabsolutwerte in Abhängigkeit der anliegenden Steuerspannung kann ebenfalls beobachtet werden. Für die Steuerspannungen 2 V und 5 V zeigt Abbildung 103 jedoch geringere Flächenpressungsmittelwerte zu Bearbeitungsbeginn, welche (wie auch bei $U_{Ein} = 10$ V) über der Honzeit nur leicht abfallen. Diese flache Abnahme der Honleistennor-

malkräfte ist auf die geringe Zerspanleistung des Schneidmittels D35 zurückzuführen. Die Schwankungen im Absolutwert zu Prozessbeginn sind einerseits auf den nicht gänzlich reproduzierbaren Anlageprozess der Honleisten zurückzuführen. Andererseits wird die Mittelwertbildung durch die ungleichmäßige Messwertstreuung stark beeinflusst.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Zeitl. Skalierung	Nein
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 21,25 s	Drehrichtung FH1	Re / Li
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honleisten FH1	D172	Drehrichtung FH2	Re / Li
Wechsellauf aktiv	ja	Honleisten FH2	D35	Kühlschmierstoff	Honöl

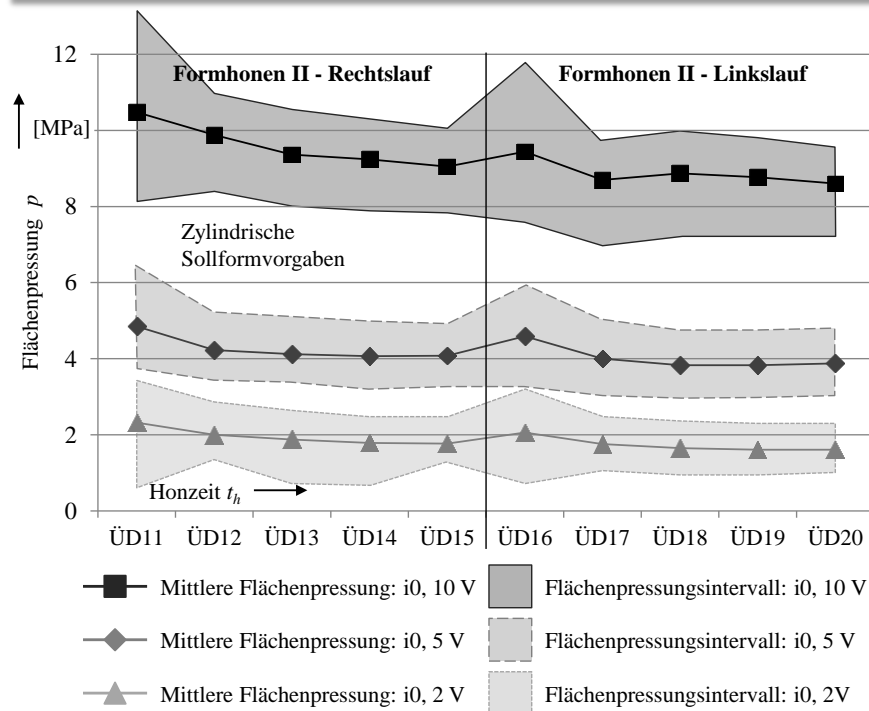


Abbildung 103: Mittlere Flächenpressung in Abhängigkeit von Steuerspannung und Hondauer für D35

Neben der Betrachtung der zylindrischen Sollformvorgaben zeigt Abbildung 104 (links) die gemessene Honleistennormalkraft für die jeweils erste Spindeldrehung der ersten drei vollständigen Überdeckungen für eine Harmonische vierter Ordnung. Dabei werden für die lokalen Extrema der vier Stellen maximaler Ansteuerspannung unterschiedliche Absolutwerte erfasst. Diese können auf die Zylindrizitätstoleranzen der vorgehonten Bohrung zurückgeführt werden. Weiterhin reduzieren sich die Maximalkräfte infolge des Freischneidens der Formhonleisten während der ersten drei vollständigen Überdeckungen um ca. 50 %. Entsprechend Abbildung 102 bestätigt dies einen nichtlinearen Abfall der Normalkräfte über der Honzeit. Zusätzlich zeigt Abbildung 104 (rechts) die zugehörigen Ansteuerspannungen in Form einer Harmonischen vierter Fourierordnung. Erkennbar ist hierbei zudem der systemseitig implementierte Vorhaltewinkel.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Zeitl. Skalierung	Nein
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honleisten FH1	D172	Drehrichtung FH1	Re / Li
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Sollformvorgabe	4. Harmonische	Kühlschmierstoff	Honöl
Wechsellauf aktiv	ja	Exemplarische Darstellung des Normalkraftverlaufs für die ersten 3 ÜDs			

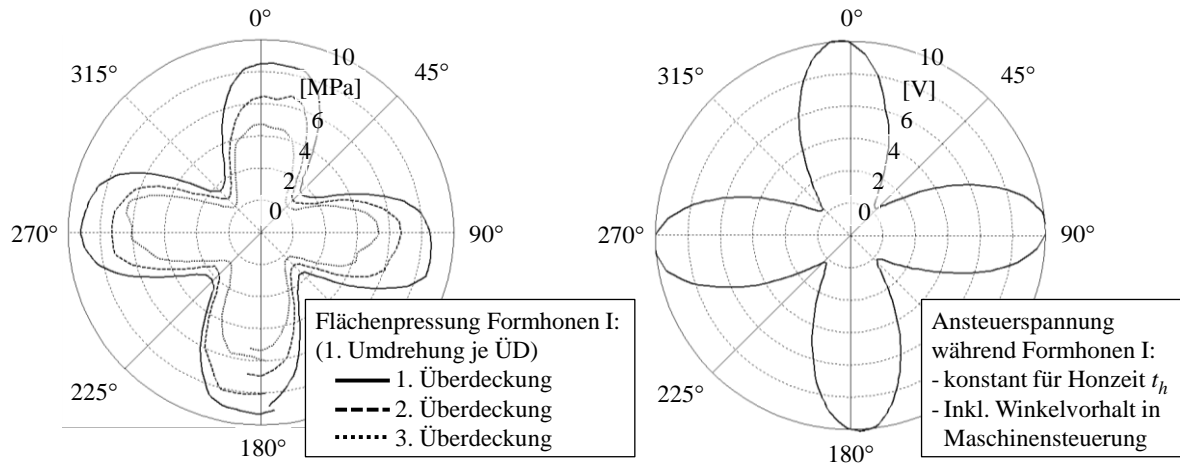


Abbildung 104: Flächenpressung je Überdeckung bei zeitlich konstanter Spannungsvorgabe (4. FO, 0 V - 10 V)

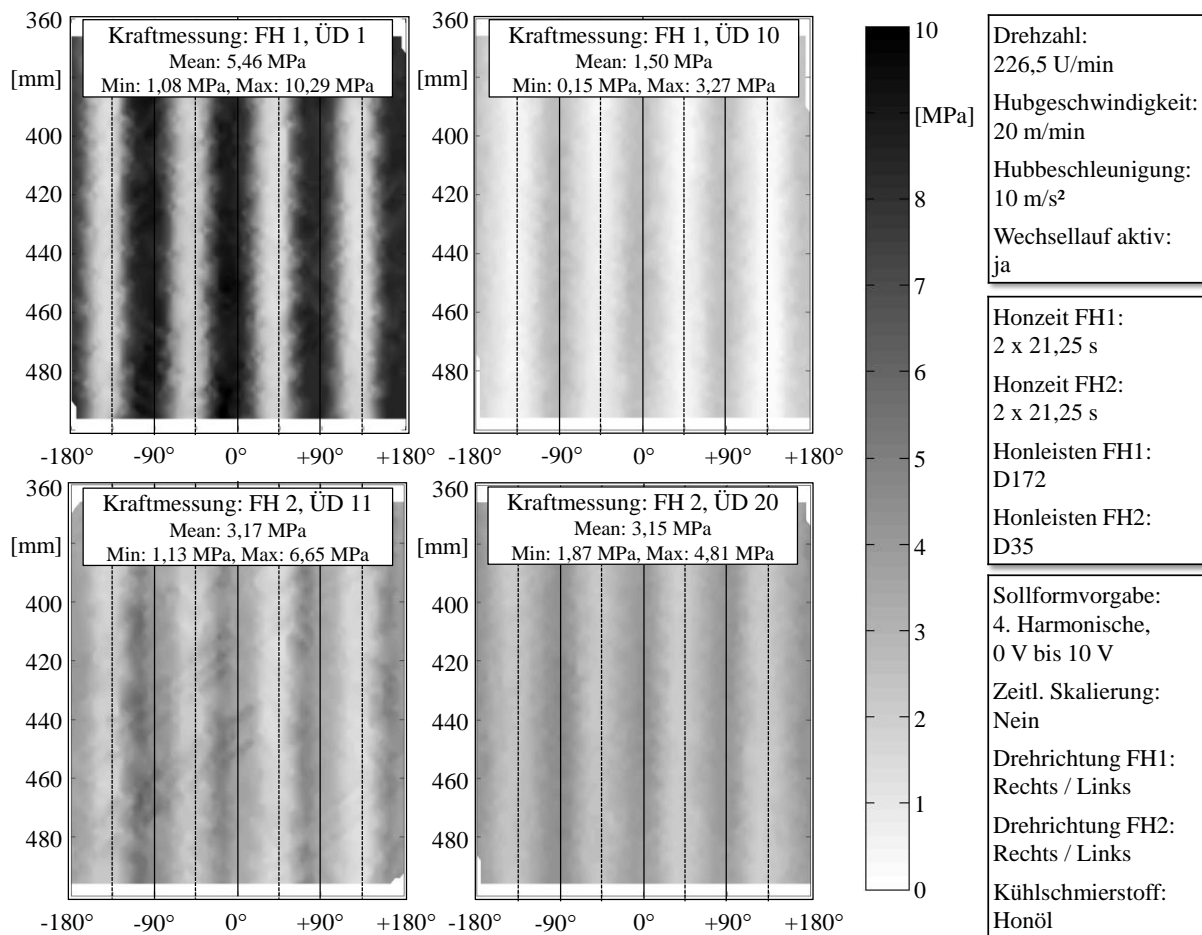


Abbildung 105: Flächenpressung je Überdeckung, Sollform 4. Harmonische, 0 V - 10 V, Formhonen I & II

In Abbildung 105 sind die Flächenpressungen für die jeweils erste und letzte vollständige Überdeckung der Zylinderwand durch die Formhonleisten für die Prozessschritte Formhonen I und Formhonen II dargestellt. (Anmerkung: Abbildung 104 und Abbildung 105 basieren auf denselben Versuchsergebnissen.) Als Sollformvorgabe liegt eine Harmonische Schwingung vierter Fourierordnung mit einem Steuerspannungsbereich von 0 V bis 10 V zugrunde. Neben der Trägheit des Zustellsystems und dem daraus abgeleiteten Vorhaltewinkel führt vor allem die passive Leistenrückstellung in Abhängigkeit des Spindeldrehsinns zu einem Phasenfehler gegenüber der Sollformvorgabe. Der stärkere Abfall der Honnormalkraft über der Honzeit im Bearbeitungsschritt Formhonen I (ggü. Formhonen II) ist der höheren Zerspanleistung der groben Diamantkörner (D172) begründet. Entsprechend Abbildung 41 äußert sich dies in einem Anteil von ca. 87 % der maximalen Formausprägung für den Arbeitsschritt Formhonen I. Den Einfluss der zeitlichen Skalierung der Steuerspannungen auf die Honnormalkraft zeigt das folgende Kapitel 7.3.2.

7.3.2 Prozessoptimierung beim Formhonen mittels Kraftmessuntersuchungen

Die in diesem Kapitel diskutierten Kraftmessergebnisse, basieren auf dem in Kapitel 6.2.1 und 6.2.2 gezeigten Versuchsplan zur Ermittlung des Schneidmitteleinflusses auf das Formhonergebnis und wurden bereits unter [242] veröffentlicht. Für die Prozessschritte Formhonen I und Formhonen II werden für alle Schneidmittelkombinationen die Honnormalkräfte aufgezeichnet und ausgewertet. Dabei wird für die Referenzschneidmittel die Sollform unter Nutzung einer zeitlich äquidistanten Skalierung der Ansteuermatrix iterativ eingefahren. Zusätzlich zu den Kraftmesssignalen werden erneut das Zerspanvolumen sowie die radiale Formausprägung ermittelt (Abbildung 106).

Verglichen mit der nicht skalierten Referenzbohrung werden durch die Nutzung zeitlich skalierten Ansteuermatrizen lediglich noch 70,9 % der radialen Formausprägung und 61,9 % des Zerspanvolumens erzielt. Wie erwartet verringern sich mit abnehmender Korngröße die radiale Formausprägung und das Zerspanvolumen. Zwischen den Schneidmitteln D76 und D64 fallen diese Unterschiede jedoch sehr gering aus. Einer Absenkung der Korngröße von D76 auf D64 (-15,8 %) stehen hier ein Minus von 5,7 % in der radialen Formausprägung und ein um 1,6 % verringertes Zerspanvolumen gegenüber.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Zeitl. Skalierung	Nein
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 21,25 s	Drehrichtung FH1	Re / Li
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honleisten FH1	Variation	Drehrichtung FH2	Li / Re
Wechsellauf aktiv	ja	Honleisten FH2	Variation	Kühlschmierstoff	Honöl

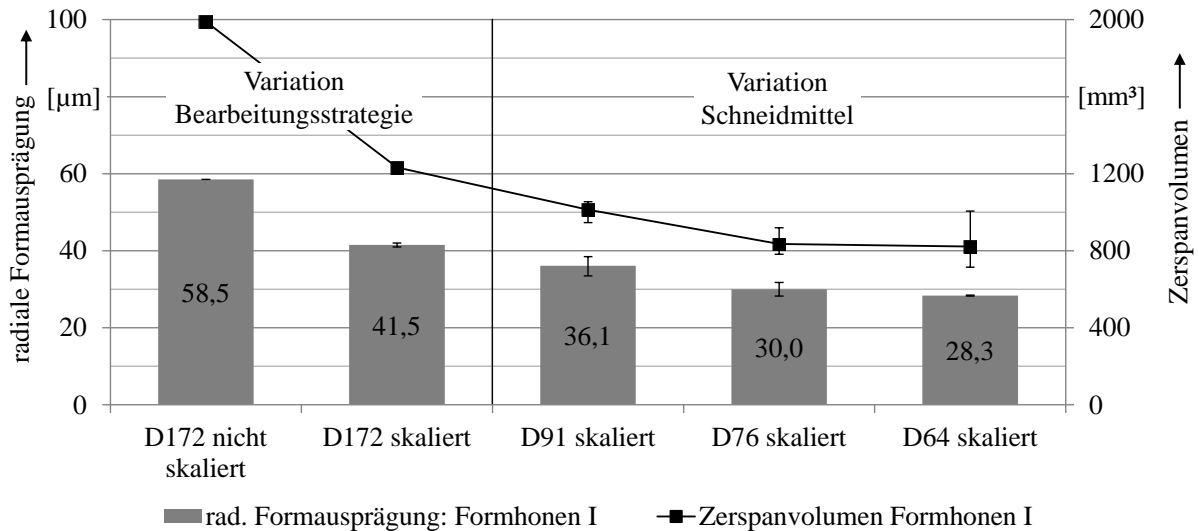


Abbildung 106: Zerspanvolumen und radiale Formausprägung; Formhonen I; alle Schneidmittelvarianten

Die zeitliche Entwicklung der Flächenpressung während des ersten Formhonschrittes für die skalierte und nicht skalierte Referenzbohrung zeigt folgende Auffälligkeiten: In Abbildung 107 unten sind für die beiden Referenzbohrungen die lokalen Flächenpressungen für die erste Überdeckung der Zylinderlaufbahn durch die Kraftmessleiste dargestellt. Dabei findet sich die abgewinkelte Sollform in den gemessenen Flächenpressungen wieder. Zudem führt die gewählte Skalierungsart und –schrittweite bei dem Referenzschneidmittel D172 zu nahezu konstanten mittleren Flächenpressungen p_{mean} über der gesamten Honzeit. Diese betragen dabei lediglich ca. 40 % der mittleren Kräfte der nicht skalierten Referenzbohrung während der ersten vollständigen Überdeckung.

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit FH1	2 x 21,25 s	Zeitl. Skalierung	Variation
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit FH2	2 x 21,25 s	Drehrichtung FH1	Re / Li
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honleisten FH1	D172	Drehrichtung FH2	Li / Re
Wechsellauf aktiv	ja	Honleisten FH2	D35	Kühlschmierstoff	Honöl

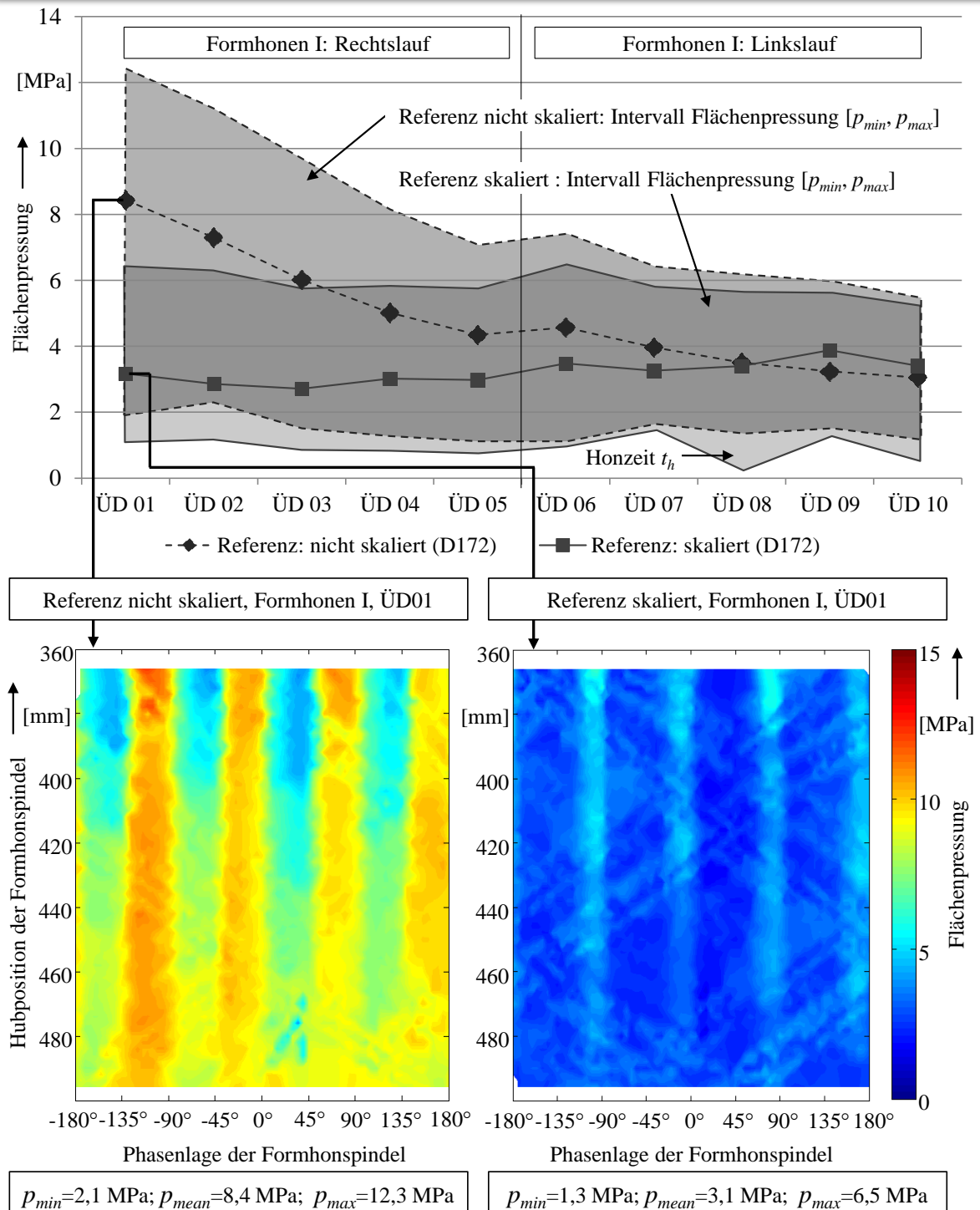


Abbildung 107: Flächenpressung Referenzbohrungen unskaliert und skaliert; Formhonen I

Die Nutzung zeitlich skalierten Ansteuer matrizen verursacht in diesem Fall eine Halbierung der maximalen Flächenpressung p_{max} zu Bearbeitungsbeginn, wodurch sich auch ein deutlich engeres Intervall $[p_{min}, p_{max}]$ an Bearbeitungskräften einstellt. Nach oben wird das Kräfteinter-

vall durch die Skalierung der Ansteuerspannungen zur Vermeidung von Schichtschädigungen begrenzt, nach unten durch die Überlagerung von Anlegekraft und minimaler Ansteuerspannung (p_{min}). Die Anlegekraft entspricht dabei der Kraft, die von der Grobzustellung des Aktorpakets ausgeht und mit der die vier Formhonleisten an die Bohrungswand, bei einer Aktorspannung von 0 V, angelegt werden. Verglichen mit der Serienfertigung von thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen, für die Schnell [237] Werte zwischen 0,5 MPa und 2 MPa in Abhängigkeit des Zustelldrucks, der Honleistenabmessungen und -anzahl nennt, sind die mittleren Prozesskräfte der skalierten Referenzbohrung immer noch hoch. Dies kann dadurch begründet werden, dass beim Formhonen mit kleineren und einer geringeren Anzahl an Honleisten ein größeres Materialvolumen bei gleicher Taktzeit zerspannt werden muss.

Bei Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der mittleren Flächenpressung (Abbildung 107) fällt auf, dass beide Referenzbohrungen zu Bearbeitungsende (Überdeckung 10) ein ähnliches Kraftniveau bzw. Kraftintervall $[p_{min}, p_{max}]$ erreichen, welches allerdings bei unterschiedlicher Formausprägung auftritt. Zudem ist bei beiden Referenzbohrungen zwischen Überdeckung 5 und 6 ein Anstieg der mittleren Flächenpressung erkennbar, was auf den Drehrichtungswechsel der Formhonspindel und die damit verbundene Korrektur eines Phasenfehlers zurückzuführen ist [47]. Weiterhin ist bei der skalierten Referenzbohrung ein leichter Anstieg der mittleren Flächenpressung über der Honzeit erkennbar. Die In-Prozess-Kraftmessung bietet somit einerseits die Möglichkeit sofort Veränderungen am Honprozess zu erkennen. Andererseits stellt sie die Grundlage für eine spätere Implementierung einer Prozessregelung auf Basis des gemessenen Honleistenanpressdrucks dar.

Abbildung 108 zeigt die mittlere Flächenpressung je Überdeckung für alle Schneidmittelvarianten während des ersten Formhonschrittes. Aufgrund der geringeren Zerspanleistung kleinerer Schneidkörner wurde ausgehend von einem ähnlichen Kraftniveau ein über die Honzeit ansteigender Kraftverlauf für die Schneidmittel D91, D76 und D64 erwartet, wobei der Anstieg der Honleistennormalkräfte für das Schneidkorn D91 geringer ausfallen sollte als bei der Korngröße D64. Dies ist dadurch zu begründen, dass für ein geringeres Zerspanvolumen eine geringere Aktorauslenkung erforderlich ist. Bei gleicher Ansteuerspannung bewirkt eine geringere Aktorauslenkung eine höhere Aktorkraft, welche auf die Honleisten wirkt. Die zeitliche Entwicklung der mittleren Flächenpressung der Korngrößen D76 und D64 zeigt diesen leichten Anstieg der Bearbeitungskräfte über der Honzeit. Für die Korngröße D76 sind dies im Mittel +0,136 MPa/ÜD, für das D64-er Korn +0,102 MPa/ÜD. Mit +0,003 MPa/ÜD wurden für die Korngröße D91 sogar gleichmäßigere mittlere Flächenpressungen wie für das Re-

ferenzschneidmittel (+0,085 MPa/ÜD) ermittelt. Aufgrund der aktuellen Aktorauslegung sind diese Unterschiede im zeitlichen Verlauf der Normalkräfte bei den vorliegenden Formausprägungen nur sehr gering. Es wird dennoch empfohlen, die Skalierungsschrittweite für die Körnungen D172, D76 und D64 zu senken. Entgegen der Erwartungen zeigt sich mit sinkender Korngröße eine Verringerung im Absolutniveau der Honleistennormalkräfte gegenüber den Referenzbohrungen. Folgender Zusammenhang wird hierbei vermutet: Da mit kleinerer Korngröße der Kornüberstand sinkt (D64 ca. 20 µm Kornüberstand vs. D91 ca. 30 µm Kornüberstand), müssen bei kleineren Korngrößen die Schneidkörner weniger tief in die LDS-Schicht eindringen (weniger Kraft) bis die Bindung an der LDS-Oberfläche anliegt. Da die Honleistenbindung weich und ggf. elastisch verformbar ist, wird vermutet, dass ein Teil der Flächenpressung von der Bindung aufgenommen wird.

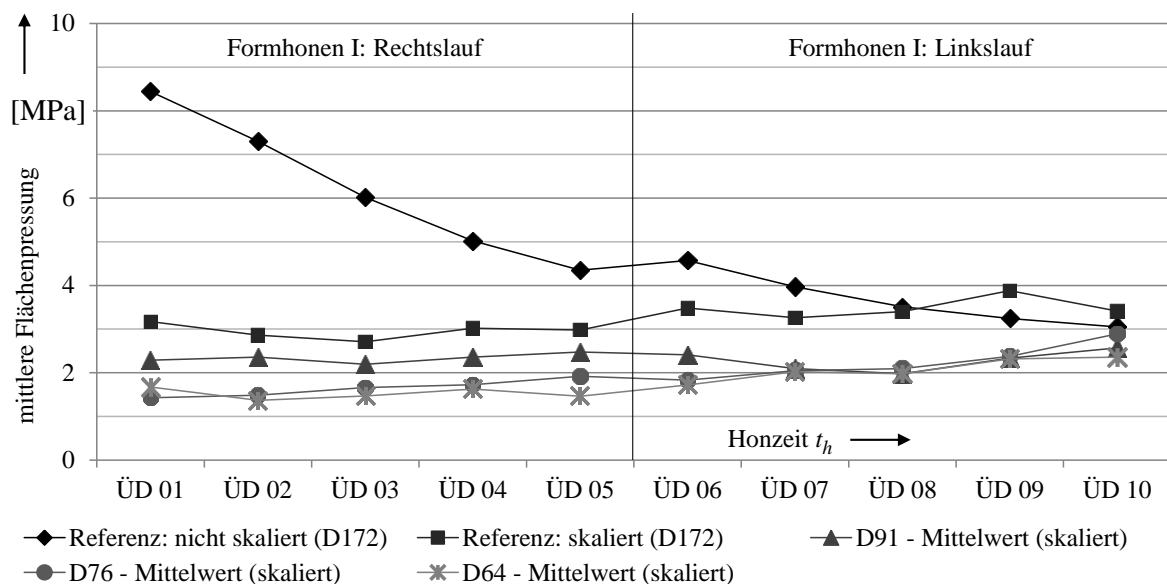
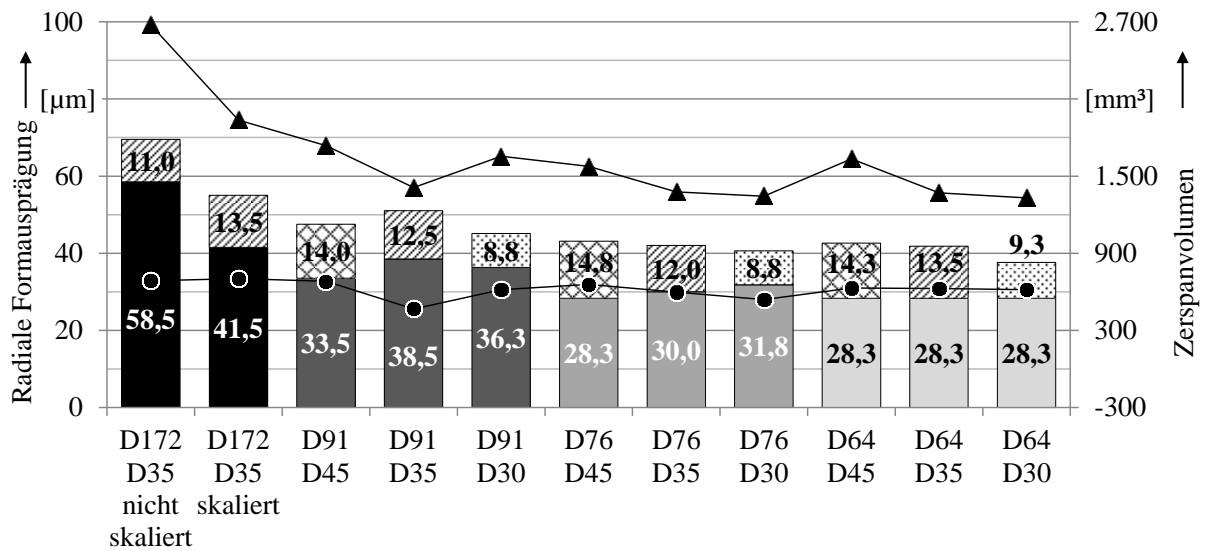


Abbildung 108: Mittlere Flächenpressung je Überdeckung; Formhonen I; alle Schneidmittelvarianten

Auch für den zweiten Formhonschritt wurden zusätzlich zu den Honleistennormalkräften die radiale Formausprägung und das Zerspanvolumen ermittelt (Abbildung 109). Wie für die Schneidmittel des ersten Formhonschrittes zeigt sich, dass mit abnehmender Korngröße die radiale Formausprägung sowie das Zerspanvolumen abnehmen; D45 (14,3 µm; 656,1 mm³) > D35 (12,5 µm; 615,6 mm³) > D30 (8,9 µm; 590,6 mm³). Die Auswertung der mittleren Flächenpressungen je Überdeckung für die Referenzkörnung D35 im zweiten Prozessschritt (Abbildung 110) zeigt ähnliche Auffälligkeiten wie die des ersten Prozessschrittes.



Radiale Formausprägung: Formhonen I bzw. Formhonen II

D172 (Referenz)
 D91
 D76
 D64
 D35 (Referenz)
 D45
 D30

Zerspanvolumen Formhonen I + II:

Zerspanvolumen Formhonen II:

Abbildung 109: Zerspanvolumen und radiale Formausprägung; Formhonen II; alle Schneidmittelvarianten

Bei der unskalierten Referenzbohrung sinkt die mittlere Flächenpressung mit fortschreitender Bearbeitungszeit. Bei der skalierten Referenzbohrung, sowie den übrigen drei Bohrungen herrschen zu Bearbeitungsbeginn deutlich niedrigere Flächenpressungen, die aber verglichen mit dem ersten Prozessschritt stärker streuen. Betrachtet man in Abbildung 110 die zeitliche Entwicklung der mittleren Flächenpressung, so fällt auf, dass alle Bohrungen zu Bearbeitungsende (Überdeckung 10) ein ähnliches Kraftniveau erreichen. Für die Schneidmittel D45 und D30 konnten die gleichen Beobachtungen gemacht werden und es zeigte sich (wie bereits in Prozessschritt 1), dass die Absolutwerte der Kraftmessungen stark streuen, was keine Abhängigkeiten zwischen Korngröße und Honleistennormalkraft erkennen lässt. Insgesamt lässt sich für den zweiten Formhonschritt festhalten, dass die definierte Skalierungsschrittweite unabhängig von den verwendeten Schneidkörnern gut gewählt wurde. Der zeitliche Trend der mittleren Flächenpressung je Überdeckung bleibt für die Schneidmittel D45, D35 und D30 nahezu konstant.

Abbildung 111 (rechts oben) zeigt die Wirksamkeit der Begrenzung der Maximalkräfte beim Formhonen mittels Faxfilmaufnahmen. Die hierdurch erzeugte Oberfläche nach dem Glätthonen weist weniger große Fehlstellen (Partikel ausbrüche) als die Referenzbohrung auf, bei der keine zeitliche Skalierung der Ansteuerspannungen erfolgte (Abbildung 111 links).

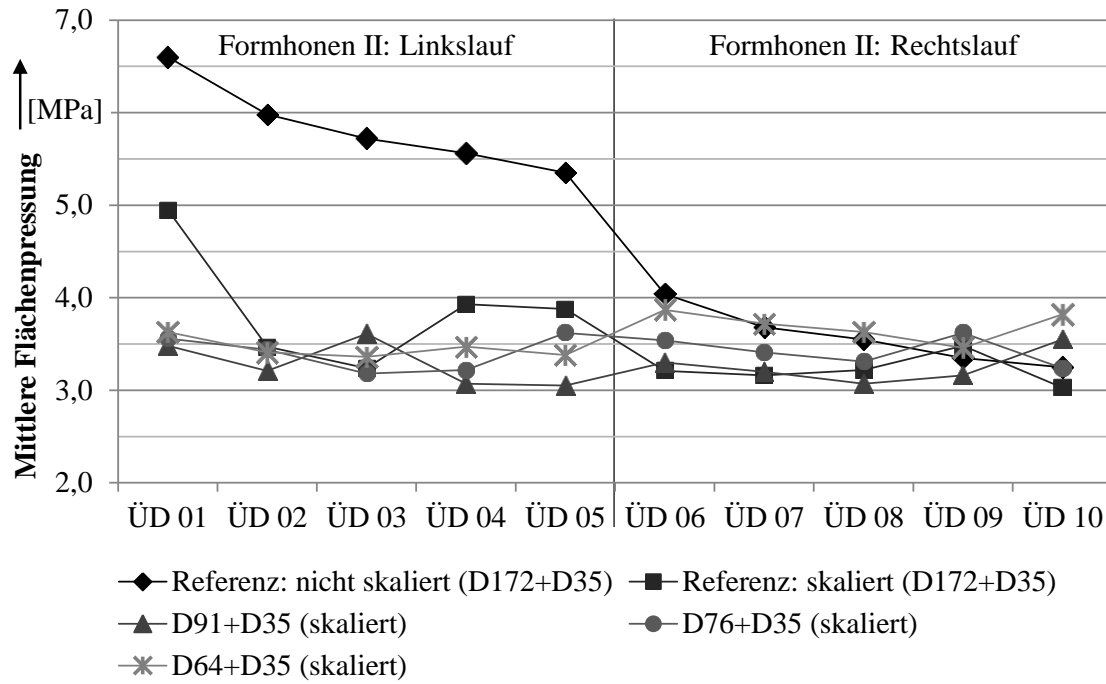


Abbildung 110: Mittlere Flächenpressung je Überdeckung; Formhonen II; Schneidmittel D35

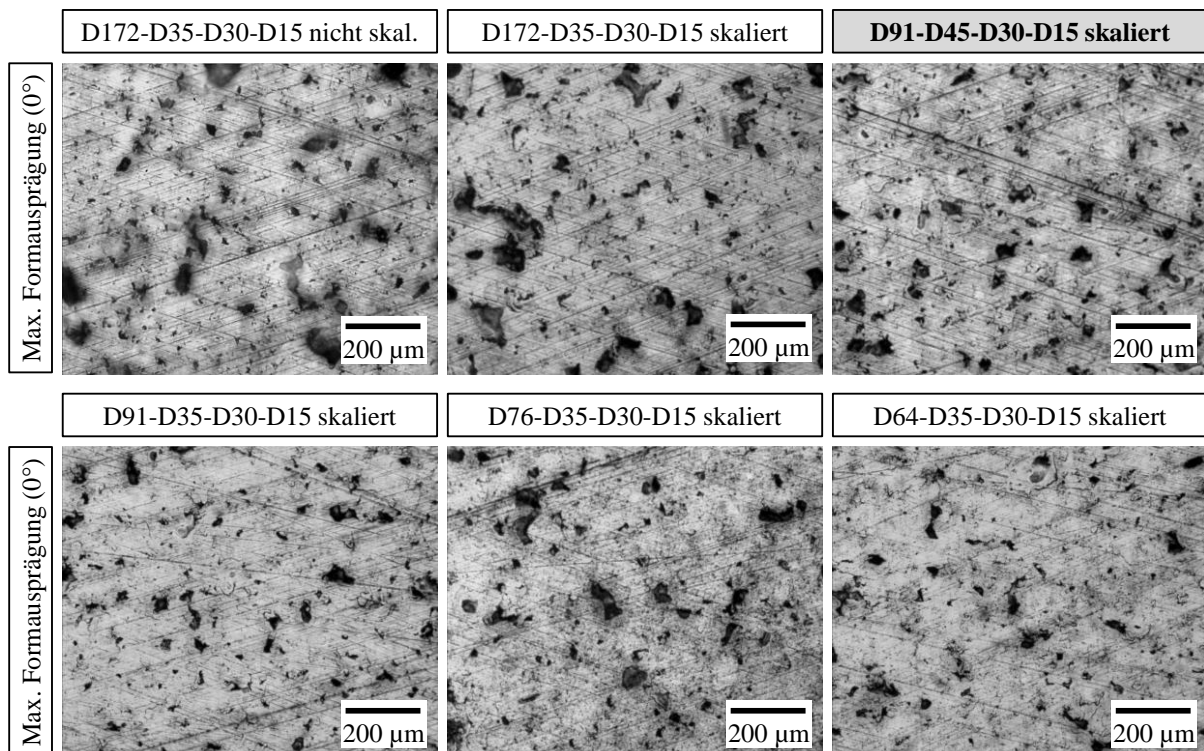


Abbildung 111: Faxfilmaufnahmen ausgewählter Schneidmittelvarianten nach Form- und Glätthonen

7.4 Zusammenfassung – Normalkraftmessung an der Honleiste

Die quasistatisch unverspannten Untersuchungen zeigen, dass die frequenzabhängige Änderung der Honleistenauslenkung einem linearen Trend folgt. Gleichzeitig beeinflusst die Art des Steuerspannungssignals die maximale Honleistenauslenkung. Für rechteckige Spannungssignale werden die größten Honleistenauslenkungen ermittelt. Die quasistatisch verspannten Untersuchungen zeigen, dass die Verläufe der piezoelektrischen Zustellkräfte sowie der erkennbare Phasenversatz (ca. 10° bis 55° je Schwingung) zwischen Steuerspannungssignal und Zustellkraft von der Steuerspannung (Signalart, -frequenz, -amplitude und –mittelspannung) abhängig sind. Weiterhin zeigen die Analysen der Kraftverläufe, dass die Ein- und Ausschwingphasen der Honleisten das Resultat der mechanischen Reibvorgänge im Werkzeug sowie der Werkzeugsteifigkeit sind. Zum Ausgleich des Phasenfehlers führt die Implementierung eines Vorhaltewinkels je Spindeldrehsinn zu einer verbesserten Formgenauigkeit im Formhonbetrieb.

Für die Bearbeitung von thermischen Spritzschichten müssen aufgrund der Gefahr von Schichtschädigungen die Prozesskräfte mittels zeitlicher Skalierung der Ansteuermatrizen reduziert werden. In dieser Arbeit wurde eine In-Prozess-Messmethodik entwickelt, um die Honleistennormalkräfte zu ermitteln und die Skalierungsschrittweite optimal auszulegen. Neben dem absoluten Kraftniveau während des Honens bzw. einzelner Honsteinanstellungen kann damit auch erstmalig der zeitliche Verlauf der Honleistennormalkräfte beobachtet werden. Das Ziel, die Oberflächentopographie der Bohrungen auch für die zeitlich und örtlich unterschiedlichen Zeitspanvolumen zu vereinheitlichen, konnte durch die Honstrategie mit skalierten Ansteuerwerten für die Aktoren erreicht werden. Die In-Prozess-Messungen der Honkräfte erklären, dass dies durch eine deutliche Reduktion der Honnormalkräfte möglich wurde. Neben der Ermittlung der Honleistennormalkräfte bietet das Kraftmesssystem die Möglichkeit, das quasistatische Übertragungsverhalten des Formhonwerkzeugs bzw. der Zustelleinheit zu bestimmen. Hierzu wird zusätzlich zur Hub- und Phasenlage, der Ansteuer-spannung und Honleistennormalkraft auch die Piezoaktorkraft gemessen. Diese Ergebnisse können zur Prozessauslegung und Validierung eines Simulationsmodells herangezogen werden. Das Modell soll die bislang iterative Prozessauslegung optimieren.

8 Ableitung einer optimierten Prozessstrategie

8.1 Versuchsbeschreibung

Auf Basis der Untersuchungen aus Kapitel 5, 6 und 7 werden die erprobten Einzelmaßnahmen miteinander kombiniert, um eine bestmögliche Bearbeitungsqualität zu erzeugen. Die Änderungen beinhalten die in Kapitel 4.5 beschriebenen Prozesseingriffe.

Tabelle 17: Bearbeitungsparameter unter Verwendung der abgeleiteten Prozessstrategie

Formhonoperationen		
Bearbeitungsparameter	Wert	
Hubgeschwindigkeit v_H [m/min]	20	
Hubbeschleunigung a_H [m/s ²]	10	
Drehzahl n [1/min]	226,5	
Zeit je vollständiger Überdeckung $t_{\ddot{U}D}$ [s]	4,25	
Formhonstufen	Formhonen I: Rechts- / Linkslauf Formhonen II: Links- / Rechtslauf	
Bearbeitungszeit je Drehrichtung	$5 \times t_{\ddot{U}D} = 21,25 \text{ s}$	
Bearbeitungszeit je Formhonstufe	$2 \times 5 \times t_{\ddot{U}D} = 42,5 \text{ s}$	
Bearbeitungsparameter	Formhonen I	Formhonen II
Drehrichtung Honspindel	Rechts- / Linkslauf	Links- / Rechtslauf
Schneidmittel	D91	D45
Anlegekraft Formhonleisten	$p_{AN} = 0,91 \text{ MPa}$	$p_{AN} = 1,72 \text{ MPa}$
Anlegekraft Stützleisten	$p_{AN_St} = 0,40 \text{ MPa}$	$p_{AN_St} = 0,40 \text{ MPa}$
Skalierung Ansteuerspannungen	gemäß Tabelle 9	gemäß Tabelle 9
Glätthonoperationen		
Parameter	Glätthonen I	Glätthonen II
Drehrichtung Honspindel	Rechts- / Linkslauf	Linkslauf
Schneidmittel	D30	D15
Federhärte D [N/mm]	26,1	26,1
Honzeit t_h [s]	$2 \times 10,5 \text{ s}$	21 s

Da alle Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit bereits am Realbauteil durchgeführt werden, ergeben sich hier bezüglich der Kurbelgehäusespezifikationen, Fertigungstoleranzen und

Bauteilauflösung keine neuen Randbedingungen. Grundlage dieser Prozessvalidierung bildet weiterhin die in Kapitel 5.5.1 definierte Sollform. Die Beurteilung der Bearbeitungsqualität erfolgt im Anschluss an die letzte Formhohlstufe sowie nach den einzelnen Glättungsstufen, da die eingeleiteten Optimierungsmaßnahmen in diesen Prozessschritten wirksam sind. Die Versuchsparameter können der Tabelle 17 entnommen werden.

8.2 Validierung eines an LDS-Schichten angepassten Formhonorprozesses

Die in den vorangegangenen Kapiteln betrachteten Eingangsgrößen im Hinblick auf die Optimierung des Formhonorergebnisses in Bezug auf Oberflächengüte, Formgenauigkeit und Honleistenverschleiß sollen in einem letzten Validierungsschritt miteinander kombiniert werden. Ziel ist es, die erprobten Einzelmaßnahmen so aufeinander abzustimmen, dass eine bestmögliche Bearbeitungsqualität erzeugt wird. Die Prozessanpassungen (siehe Tabelle 17) betreffen neben der Reduktion der Bearbeitungszeit die Absenkung der Prozesskräfte, eine Änderung der Drehrichtungsfolge der Honspindel, eine Erhöhung des Zeitspanvolumens an der Bohrungseingangsstelle sowie der Federhärte bei der Glätthonbearbeitung und die Anpassung der Schneidmittelspezifikationen. Da die Qualitätsanforderungen für die Technologie des Freiformhonens in der Literatur bis dato nicht definiert sind, sei erneut auf die für diese Arbeit gültigen Grenzwerte hinsichtlich Form und Oberfläche verwiesen (Kapitel 4.4).

Bearbeitungsparameter:

Drehzahl	226,5 U/min	Honzeit t_h Formhonen 1	2 x 21,25 s	Honleisten Formhonen 1	D91
Hubgeschwindigkeit	20 m/min	Honzeit t_h Formhonen 2	2 x 21,25 s	Honleisten Formhonen 2	D45
Hubbeschleunigung	10 m/s ²	Honzeit t_h Glätthonen 1	2 x 10,5 s	Honleisten Glätthonen 1	D30
Wechsellauf aktiv	ja	Honzeit t_h Glätthonen 2	2 x 10,5 s	Honleisten Glätthonen 2	D15

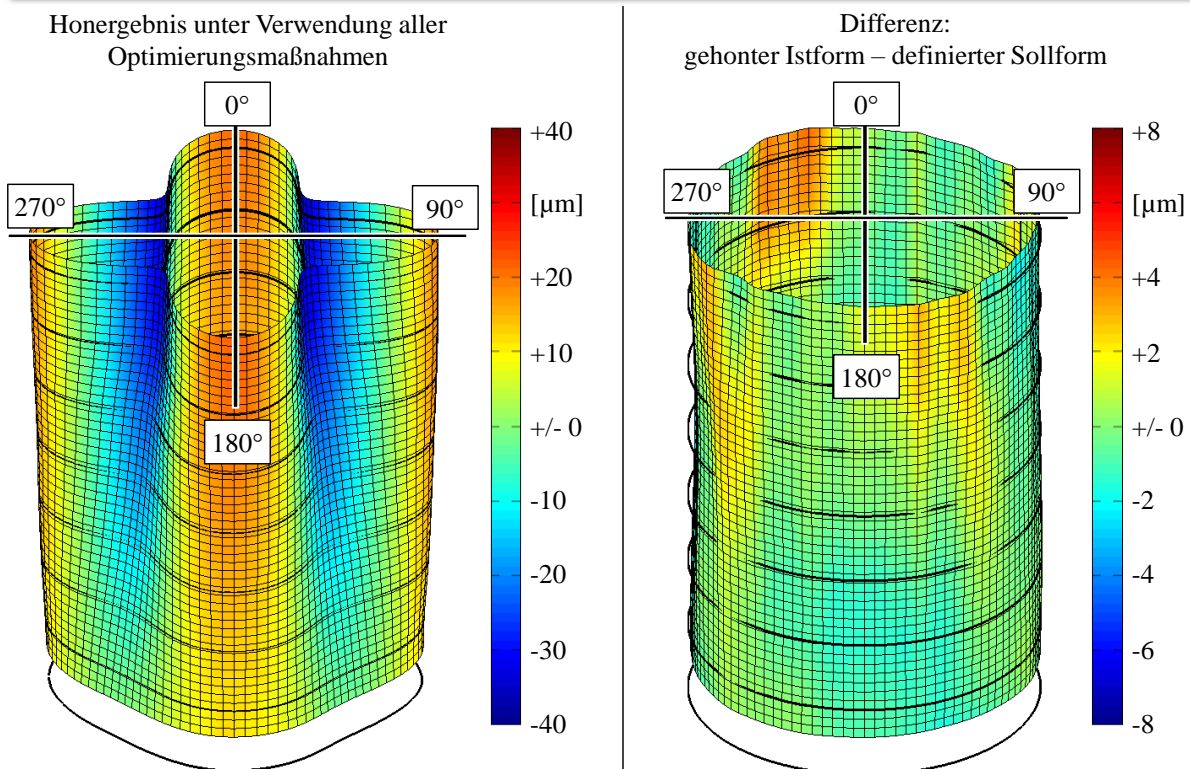


Abbildung 112 Beurteilung der gehonten Makrogeometrie – Abweichung von der Sollform

Abbildung 112, links zeigt die formgehonte Bohrungsgeometrie als Ergebnis der iterativen Prozesseinrichtung. Zur Beurteilung der Formgenauigkeit ist in Abbildung 112, rechts die

Differenzform aus gehonter sowie gemessener Istform und definierter Sollform (CAD-Daten, siehe Abbildung 62) dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die geforderten Zylinderformtoleranzen von kleiner $\pm 3,5 \mu\text{m}$ flächendeckend eingehalten werden. Die maximalen Formfehler werden dabei im Bereich der Bohrungseingestelle im oberen Bohrungsabschnitt verzeichnet und resultieren in einer gegenüber der Sollform um 45° verdrehten vierten Fourierordnung. Bezug nehmend auf das Formfüllvermögen der Kolbenringe (siehe Tabelle 1), können diese Formfehler mit niedriger Ordnungszahl als unkritisch angesehen werden.

Einschub:

Entsprechend Spitznagel [246] erfolgt die Auslegung der Ausgleichsform auf Basis einer mehrstufigen numerischen Optimierung. Bei der Ermittlung des optimalen Betriebspunktes, für welchen die warm- und kaltstatischen Zylinderverzüge vollständig egalisiert werden sollen, werden neben dem kunden- und zyklusrelevanten Fahrverhalten die Auswirkungen eines zu hohen bzw. zu geringen Deformationsausgleichs bewertet. In weiteren Schritten wird untersucht, ob zusätzliche, von der idealen Zylinderform abweichende Makrogeometrien (Konizitäten, Einschnürungen), weitere Funktionsvorteile bieten. Die Anpassung der Kolbenringvorspannung als Folge der Formhonung für einen spezifischen, unteren Lastpunkt (zyklusrelevantes Fahrverhalten) wird dabei so ausgelegt, dass die restlichen, verbleibenden Verformungen inkl. der Bearbeitungsfehler im gesamten Arbeitskennfeld des Motors ausgeglichen werden. Diese betriebspunktabhängigen Restverformungen (lastpunktspezifische Zylinderdeformationen minus formgehonte Ausgleichskontur) übersteigen dabei die Bearbeitungsfehler um ein Vielfaches. Bezogen auf die Sollform beträgt die Amplitude der Formfehler lediglich maximal 6,5 % und wirkt sich auch aufgrund ihrer Phasenlage (Bohrungseingestelle) und Ordnungszahl (0., 2., 4. Fourierordnung) nicht nachteilig auf die Motorfunktion aus. Die Fourierzerlegung der Differenzform zeigt zudem, dass die Formfehler oberhalb der 8. Harmonischen geringer als $1 \mu\text{m}$ ausfallen und somit maßgeblich aus der Messtoleranz ($\pm 1 \mu\text{m}$) des verwendeten Formmessgeräts resultieren.

Tabelle 18: Beurteilung der gehonten Makrogeometrie – Radiale FA und radiale Zerspanung an Engstelle

Radiale Formausprägung und radiale Zerspanung an der Bohrungsengstelle				
	Formhonen I	Formhonen II	Glätthonen I	Glätthonen II
Radiale Zerspanung (Bohrungsengstelle)	Mean: 19,6 μm	Mean: 12,1 μm	Mean: 5,5 μm	Mean: 2,0 μm
	Min: 18,5 μm	Min: 11,0 μm	Min: 5,0 μm	Min: 2,0 μm
	Max: 20,5 μm	Max: 13,5 μm	Max: 6,0 μm	Max: 2,0 μm
radiale Formausprägung	Mean: 45,6 μm	Mean: 54,3 μm	Mean: 53,7 μm	Mean: 54,0 μm
	Min: 44,0 μm	Min: 52,5 μm	Min: 53,0 μm	Min: 53,0 μm
	Max: 47,0 μm	Max: 55,5 μm	Max: 55,0 μm	Max: 55,0 μm

Die geringen Bearbeitungsfehler führen ebenfalls zu einer guten Wiederholgenauigkeit (Bearbeitungsumfang: 4 Bohrungen) und somit zu einer sehr geringen Streuung bei der Honbearbeitung. In Tabelle 18 sind hierzu die Durchschnittswerte, Maxima und Minima der radialen Zerspanung an der Bohrungsengstelle sowie die maximale radiale Formausprägung für die einzelnen Prozessschritte dargestellt. Durch die iterative Anpassung von Steuerspannungsmatrix und Skalierungsschrittweite können Zerspanvolumen und radiale Formausprägung im ersten Formhonschritt angehoben werden. Gegenüber Abbildung 76 kann so die radiale Formausprägung von ca. 36 μm auf ca. 45 μm und damit auf das Niveau des D172 Schneidmittels angehoben werden. Gleichzeitig sorgen die kleineren D91 Schneidkörner für eine (gegenüber dem D172 Schneidmittel) gleichmäßigere radiale, homogene Materialzerspanung. Die Änderung des Honleistenanpressdrucks von 0,91 MPa auf 1,72 MPa führt zu einer Anhebung der homogenen, radialen Materialzerspanung an der Bohrungsengstelle im zweiten Formhonschritt. Die radiale Materialzerspanung von ca. 5 μm bzw. 2 μm in den Prozessschritten Glätthonen I und II erfolgt sehr homogen und beeinflusst die Ausgangsform nach Formhonen II nur unwesentlich (Kapitel 5.6). Die Änderung der Anlegekraft sowie der Federhärte führt zu einer Erhöhung des Honleistenverschleißes. Gegenüber dem Ausgangszustand (Kapitel 6.2) beträgt diese Erhöhung für den Bearbeitungsschritt Formhonen II +0,15 μm bis +0,20 μm je Bohrung, für die Bearbeitungsschritte des Glätthonens konnten keine signifikanten Abweichungen vom Ist-Stand (D30: 3,39 μm /Bohrung; D15: 5,7 μm /10 Bohrungen) festgestellt werden. Weiterhin führt die Erhöhung der Federkraft zu einer ausreichenden Materialzerspanung in den Glätthonschritten, wodurch sich eine glatte Oberfläche einstellt (siehe Abbildung 113).

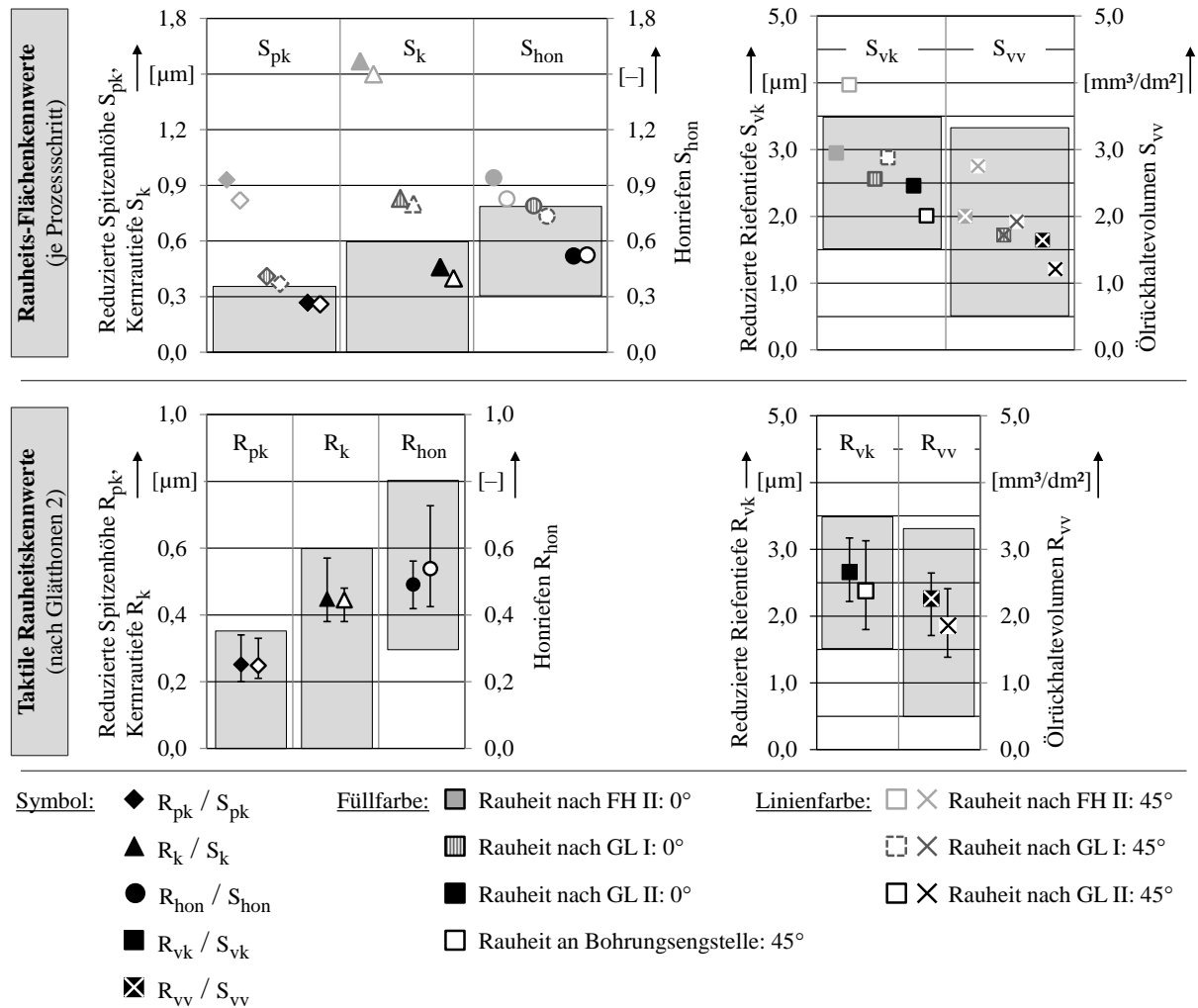


Abbildung 113: Beurteilung der gehonten Makrogeometrie – Rauheit je Honstufe

Abbildung 113, oben zeigt die Rauheit im Anschluss an die Bearbeitungsstufen Formhonen II sowie Glätthonen I und II. Die konfokalen Rauheitskennwerte basieren gemäß Kapitel 4.4.2 auf einem Bildausschnitt mit einer Größe von 4 mm². Dies gewährleistet eine repräsentative Aussage bezüglich der mittleren Oberflächentopographie. Die konfokale Rauheitsmessung erfolgt bei 0° und 45° Bohrungswinkel, da an den Stellen der maximalen und minimalen Formausprägung die größten Topographieunterschiede vorherrschen. Die Werte zeigen, dass die Anhebung der Korngröße im Prozess Formhonen II zu vergleichsweise rauen Oberflächen führt. Die nachgeschaltete Glättung der Oberfläche erfüllt neben den zuvor diskutierten Formkriterien auch die Anforderungen der Solloberfläche (siehe Kapitel 4.4.2). Zur Validierung der konfokalen Rauheitsmessungen sind in Abbildung 113 (unten) die Ergebnisse einzelner taktiler Rauheitsschriebe inklusive des Streubands nach der Glätthonbearbeitung dargestellt. Dabei liegen alle Einzelmessungen ausnahmslos innerhalb der vordefinierten Toleranzen.

Zusätzlich zu den konfokalen Rauheitsmessungen sind in Abbildung 114 und Abbildung 115 die zugehörigen Faxbild- und Konfokalaufnahmen bei 0° und 45° Bohrungsposition für die einzelnen Prozessschritte dargestellt. Neben der subjektiven Beurteilung der Faxbilder hinsichtlich Anzahl, Größe sowie Verteilung der Poren und Ausbrüche können aus den konfokalen Messdaten der Porenflächenanteil (8,7 % bis 8,8 % nach Glätthonen II – bezogen auf den Bildausschnitt) sowie die maximale Porentiefe (bis 16,44 µm nach Glätthonen II) und Oberflächenerhebung (bis 2,78 µm nach Glätthonen II) ausgeleitet werden. Die Messungen zeigen, dass durch die Glätthonbearbeitung die mittlere Porentiefe deutlich reduziert werden kann. Weiterhin werden durch die gleichmäßige Glätthonbearbeitung letzte Föhnchen und Materialaufwürfe an der Oberfläche zerspannt, sodass eine glatte Topographie erzeugt wird. Der im Bezug zur Bildfläche ermittelte Porenflächenanteil kann dabei auf < 10 % reduziert werden. Dies entspricht in etwa dem von Hannemann [93] beschriebenen mittleren Porenflächenanteil von 8 % (gemessen im Schliff) der von BMW eingesetzten LDS-Schicht. Da ein überdurchschnittliches Zuschmieren der in der LDS-Schicht enthaltenen Poren bei der Form- und Glätthonbearbeitung nicht festgestellt werden kann (siehe Abbildung 114), liegt der Schluss nahe, dass bei der entwickelten Prozessgestaltung die Porosität der thermisch gespritzten LDS-Schicht kaum beeinflusst wird.

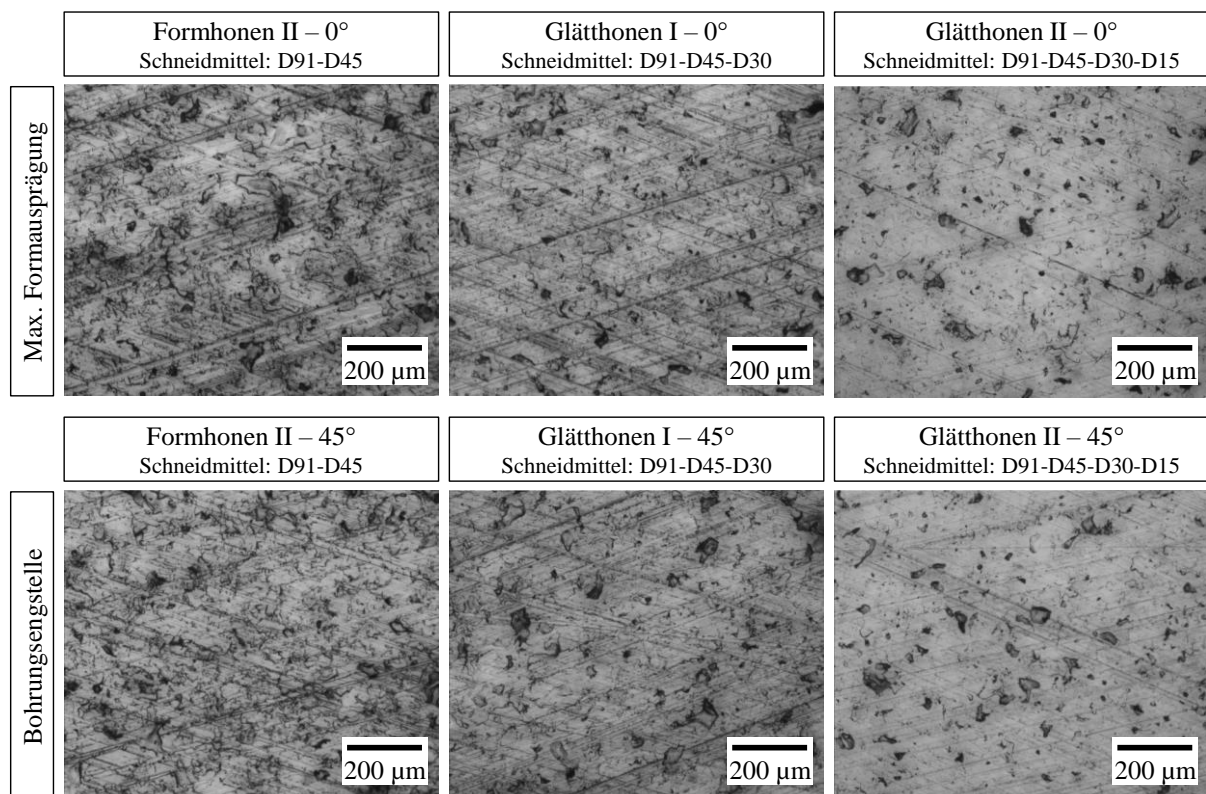


Abbildung 114: Beurteilung der formgehonten Makrogeometrie – Faxbildaufnahmen je Honstufe

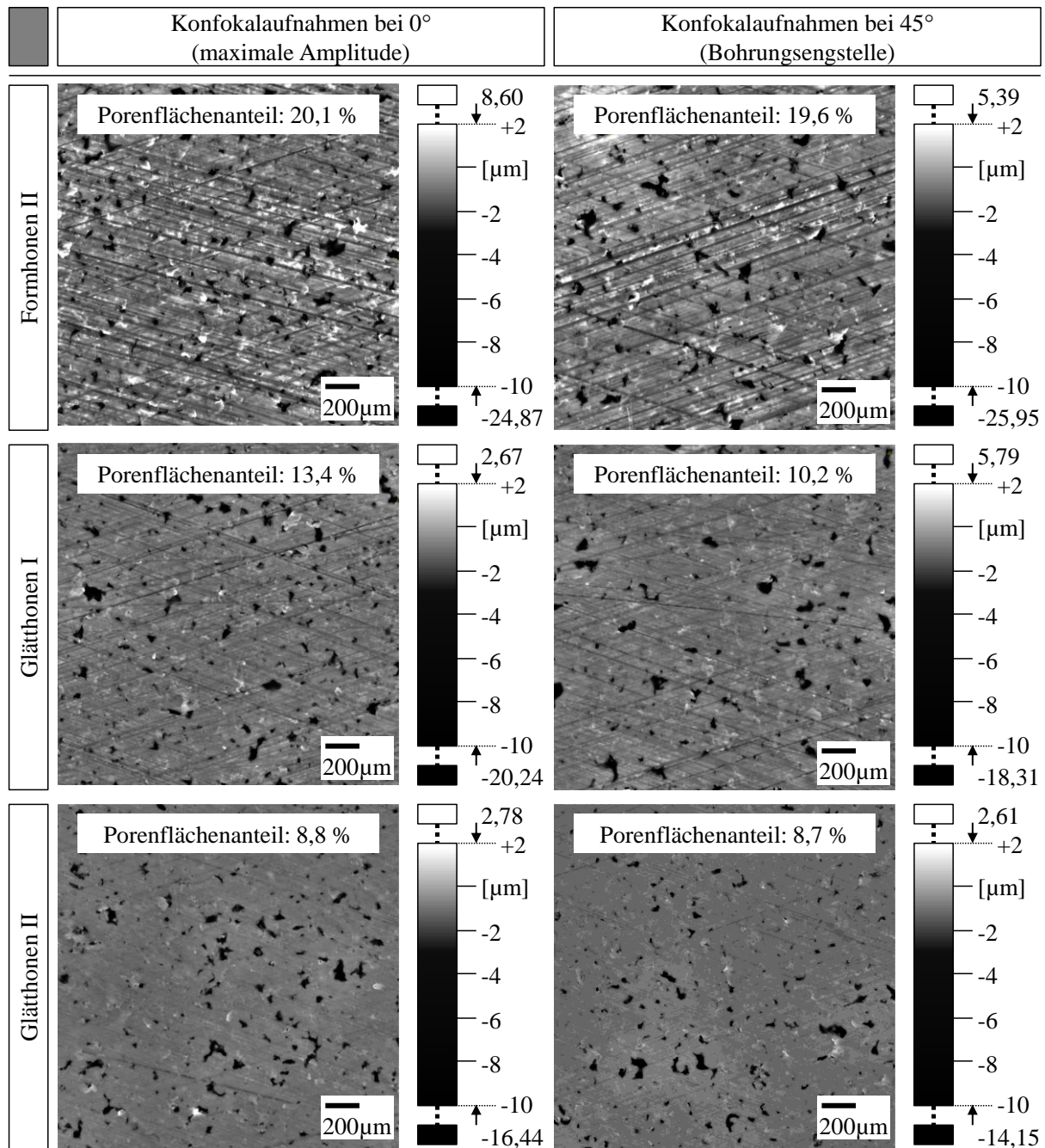


Abbildung 115: Beurteilung der gehonten Makrogeometrie – Konfokale Rauheitsmessung je Honstufe

Durch die Anpassung des Formhonprozesses (Schneidmittel, Anpressdruck und Drehrichtung) können die Form- und Oberflächenziele unter Berücksichtigung der geforderten Wiederholgenauigkeit sowie Bearbeitungszeit (Taktzeitreduktion) bei der Bearbeitung sichergestellt werden. Die geforderten Standzeiten von > 1.000 Bohrungen werden mit Ausnahme der Prozessschritte Formhonen II und Glätthonen I erreicht (Standzeiten je Prozessschritt: Formhonen I – 1.070 Bohrungen; Formhonen II – 925 Bohrungen; Glätthonen I – 885 Bohrungen; Glätthonen II – 7.015 Bohrungen). Da eine Reduktion des Honleistenverschleißes in diesen Arbeitsschritten eine Änderung und ausgiebige Erprobung des Honleistenbinders erfordert,

kann die Standzeit dahingehend vergrößert werden, indem 4 mm dicke Vollbelagsleisten anstelle der Honleisten mit 1 mm Stahlboden und 3 mm Belaghöhe verwendet werden. Hochgerechnet erhöht dies die Standzeiten von 925 auf 1.230 Bohrungen beim Formhonen II respektive von 885 auf 1.180 Bohrungen beim Glätthonen I.

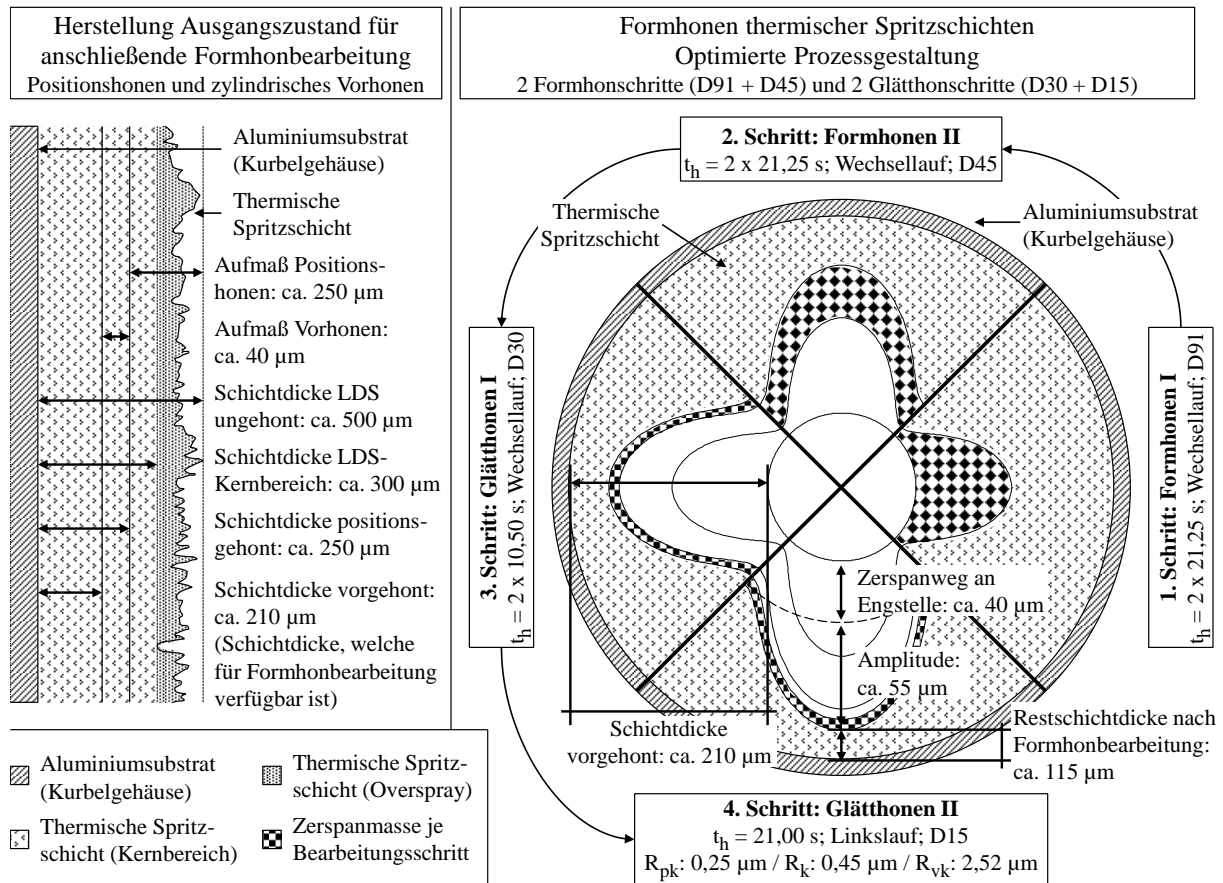


Abbildung 116: Zusammenfassende Betrachtung des verwendeten Formhonenprozesses

Nach der Beurteilung der Form- und Oberflächengüte wird abschließend der rechnerische Nachweis einer ausreichenden Restschichtdicke im Anschluss an die Form- und Glätthonbearbeitung in Abbildung 116 dargestellt. Im Rahmen der Vorbearbeitung (Positionshonen und Vorhonen) werden radial insgesamt ca. 90 µm zerspannt (Restschichtdicke ca. 210 µm). Die radiale Zerspanung während des vierstufigen Form- und Glätthonprozesses berechnet sich aus der Summe der mittleren radialen Zerspanung an der Bohrungsengstelle (40 µm) sowie der Amplitude der Sollform (55 µm). Die Restschichtdicke der verwendeten LDS-Schicht (Haftfestigkeit: 40 bis 55 MPa [171]) beträgt somit ca. 115 µm und ist somit vergleichbar mit der in [168] genannten Schichtdicke von 0,1 bis 0,15 mm im Anschluss an eine zylindrische Feinsthonung. Eine Variation des übernommenen Beschichtungsprozesses zur Änderung der Schichtdicke ist somit nicht erforderlich.

Zusammenfassung – Ableitung einer optimierten Prozessstrategie

Durch bestmögliche Kombination der erprobten Einzelmaßnahmen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die geforderten Zylinderformtoleranzen von kleiner $\pm 3,5 \mu\text{m}$ werden flächendeckend eingehalten.
- Die geringen Bearbeitungsfehler führen zu einer guten Wiederholgenauigkeit und somit zu einer sehr geringen Streuung bei der Honbearbeitung.
- Die nachgeschaltete Glättung der Oberfläche erfüllt neben den Formkriterien auch die Anforderungen der Solloberfläche.
- Durch die Glätthonbearbeitung kann die mittlere Porentiefe deutlich reduziert werden.
- Der Porenflächenanteil kann auf $< 10 \%$ (bezogen auf die Gesamtoberfläche) reduziert werden.
- Die Form- und Oberflächenziele können bei der Bearbeitung sichergestellt werden.
- Bei Verwendung von 4 mm dicken Vollbelagsleisten können die geforderten Standzeiten von > 1.000 Bohrungen in allen Prozessschritten erreicht werden.
- Die Restschichtdicke der verwendeten LDS-Schicht beträgt ca. $115 \mu\text{m}$ und liegt im Bereich der in [168] genannten Schichtdicke von 0,1 bis 0,15 mm für fertig gehonte, zylindrische Bohrungen von Verbrennungsmotoren.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Anwendung der im Stand der Technik diskutierten Formhonkonzepte in einer Großserienfertigung ist bis dato nicht realisierbar. Darüber hinaus liegen zum Formhonen thermischer Spritzschichten noch keine Untersuchungen vor. In der vorliegenden Arbeit soll daher ein Formhonprozess für thermisch gespritzte Zylinderlaufbahnen entwickelt und hinsichtlich der damit erzielbaren Formgenauigkeit, Oberflächengüte, Prozessstabilität und Werkzeugstandzeiten analysiert und bewertet werden. Dieser Ansatz wird mit dem Ziel verfolgt, die Effizienz des tribologischen Systems „Zylinderlaufbahn, Kolben, Kolbenringe und Öl“ von Verbrennungsmotoren in puncto Reibung, Emissionen und Ölverbrauch zu verbessern.

Die Versuche erfolgten auf einer Formhonmaschine mit aktiver, piezoelektrischer Zustellung der Formhonleisten. Die steuerspannungsabhängige Auslenkung der Stapelaktoren stellt die primäre Stellgröße zur Variation des hub- und phasenspezifischen Zerspanvolumens dar. Die Anwendung des Stands der Technik auf einer thermischen Spritzschicht zeigte, dass die Prozessauslegung zu oberflächennahen Schichtschädigungen führen kann.

Das Skalieren der Ansteuer matrizen über der Honzeit ermöglicht eine Reduktion der Honnormalkräfte bei gleichzeitiger Verringerung der maximal erzielbaren Formausprägung. Trotz Glättung der Oberfläche entstehen deutliche Unterschiede hinsichtlich der finalen Bearbeitungsqualität in Abhängigkeit der vorangegangenen Formhonung. Die erfassten Rauheitskennwerte zeigen, dass die bei der nachlaufenden Glätthonbearbeitung generierte, radiale Materialzerspanung (ca. $4\text{ }\mu\text{m}$) nicht ausreicht, um die Rauheit der vorangegangenen Prozessschritte vollständig zu eliminieren. Für die Prozessführung ohne zeitliche Skalierung der Steuerspannungen befinden sich die gemessenen Rauheiten zudem im oberen Grenzbereich bzw. überschreiten diese.

Die Erhöhung des Honleistenanlegedrucks zu Prozessbeginn verbesserte die Oberflächentopographie an der Bohrungseingestelle ohne die Bohrungsform signifikant zu ändern. Durch eine Steigerung der radialen Zerspanung an der kleinsten lichten Weite von ca. 50 % kann die (im Prozessschritt Formhonen I) erzeugte Rauheit egalisiert werden. Das Optimum des Anlegewerts beträgt unter den gegebenen Randbedingungen ca. 1,7 MPa.

Die Oberflächengüte formgehonter Zylinderlaufbahnen kann zudem durch Anpassung der Federkonstanten D (Änderung des Honleistenanpressdrucks) beim Glätthonen verbessert werden. Die Anhebung der Federhärte von 11,86 N/mm auf 26,05 N/mm führt zu einer beinahe Verdopplung der gesamthaften radialen Zerspanung im Glätthonprozess. Eine Änderung

der Federkonstanten D bewirkt bei formgehohten Zylindergeometrien Sollformabweichungen bis $\pm 3,5 \mu\text{m}$. Wird das Glätthonen in den Formeinrichtprozess integriert, können die Sollformabweichungen auf ein Minimum reduziert werden. Zusätzlich zeigen die gemessenen Rauheiten, dass die Kernrautiefe R_k (ΔR_k ca. $-0,5 \mu\text{m}$) sowie die reduzierte Riefentiefe R_{vk} (ΔR_{vk} ca. -1 bis $-1,3 \mu\text{m}$) durch die harten Federelemente verringert werden.

Neben der Anpassung der maschinenseitigen Prozessparameter wurde im Rahmen der durchgeführten Schneidmitteluntersuchung der Einfluss der Korngrößen auf das Honergebnis in den einzelnen Prozessschritten untersucht und angepasst. Für den Prozessschritt Formhonen I kann die Korngröße auf eine D91-Körnung herabgesetzt werden, da hierdurch die mittlere Kernrautiefe um ca. $0,5 \mu\text{m}$ verringert wird. Dies ermöglicht eine bessere Glättung in den nachfolgenden Honschritten. Gleichzeitig resultiert aus der kleineren Korngröße eine Verringerung der Zerspanleistung, welche durch eine Anhebung der Korngröße im Prozessschritt Formhonen II (D35 auf D45) weitestgehend ausgeglichen wird. Eine Schneidmittelvariation im zweistufigen Glätthonprozess führt zu keiner Verbesserung des Honergebnisses, weshalb die Referenzschneidmittel beibehalten werden. Durch den Einsatz der getroffenen neuen Schneidmittelauswahl „D91-D45-D30-D15“ kann weiteres Verbesserungspotential erschlossen werden. Verglichen mit den Referenzvarianten zeigt sich eine Verbesserung der LDS-Oberflächentopographie. Kennzeichnend wird dies durch ein homogeneres Honbild mit einer geringen Anzahl an einzelnen breiten und tiefen Bearbeitungsspuren. Die Schneidmittelauswahl verändert den Einfluss der weiteren Optimierungsmaßnahmen auf das Honergebnis. Beispielsweise erfordert die gegenüber dem Referenzstand geringere Rauheit nach Formhonen I im Folgeprozess eine geringere Materialzerspanung an der Bohrungseingestelle zur Glättung der Honstruktur.

Die quasistatischen Untersuchungen zur Ermittlung der Werkzeugdynamik wurden in einem Frequenzbereich von 5 Hz bis 50 Hz durchgeführt. Reaktionszeitbedingte Verluste in der aus der Ansteuerspannung heraus resultierenden Honleistenauslenkung ergeben sich aus den Nachgiebigkeiten im Werkzeugsystem, der indirekten Honleistenrückstellung sowie der werkzeuginneren Reibung. Die quasistatischen Versuche bilden zusätzlich die Grundlage für die Entwicklung einer In-Prozess-Messung der Honleistennormalkräfte. Diese wird zur optimalen Auslegung des Formhonprozesses sowie zur orts aufgelösten Ermittlung der Honleistennormalkräfte verwendet. Neben dem absoluten Kraftniveau während des Honens kann damit auch erstmalig der zeitliche Verlauf der Honleistennormalkräfte messtechnisch erfasst werden. Dadurch ist es möglich die Oberflächentopographie für die zeitlich und örtlich unter-

schiedlichen Zeitspanvolumina durch eine deutliche Reduktion der Honnormalkräfte zu vereinheitlichen. Gleichzeitig können so erstmals die Kenntnisse über das Übertragungsverhalten des Werkzeugs in die Gestaltung des Honprozesses einfließen.

Die Validierung des Formhonprozesses erfolgte mittels Kombination der untersuchten Einzelmaßnahmen. Die an die Sollform gestellten Anforderungen hinsichtlich Dynamik (Ordnungszahl), Formausprägung und Zerspanvolumen wurden dabei aus realen Zylinderverzügen abgeleitet und in die Sollform überführt. Es zeigt sich, dass im Rahmen dieser Arbeit die Fertigungsabweichungen deutlich reduziert und somit die radialen Formfehler auf $\Delta R(\varphi, h) \leq \pm 3 \mu\text{m}$ begrenzt werden konnten. Gegenüber [262] entspricht dies einer Verbesserung von ca. 40 % (ca. $\pm 2 \mu\text{m}$). Neben der Erreichung der Zylinderformvorgaben (bei ausreichender Restschichtdicke der thermisch gespritzten LDS-Schicht) können die geforderten Rautiefen und Werkzeugstandzeiten eingehalten werden. Die gemittelten Rauheitskennwerte betragen dabei: $R_{pk} \leq 0,25 \mu\text{m}$; $R_k \leq 0,45 \mu\text{m}$; $R_{vk} \leq 2,52 \mu\text{m}$. Unter Verwendung von 4 mm dicken Vollbelagsleisten können (hochgerechnet) zudem folgende Standzeiten realisiert werden: Formhonen I – ca. 1.400 Bohrungen; Formhonen II – ca. 1.200 Bohrungen; Glätthonen I – ca. 1.150 Bohrungen; Glätthonen II – ca. 7.000 Bohrungen.

Bei der Versuchsdurchführung am IWF wurde das Honöl Castrol Honilo verwendet. Da in modernen und nachhaltigen Serienfertigungen vermehrt Emulsionen als Kühlschmierstoff zum Einsatz kommen, gilt es in Folgeuntersuchungen die Erkenntnisse auf weitere Kühlschmierstoffe wie Emulsionen oder polymerbasierte Kühlschmierstoffe zu übertragen.

10 Literaturverzeichnis

- [1] AFFENZELLER, J. und H. GLÄSER. Kapitel 11: Schmierung und Reibung von Kolben, Kolbenringen und Zylinderlaufbuchsen. In: H. LIST und A. PISCHINGER, Hg. *Die Verbrennungskraftmaschine. Neue Folge, Lagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren*. Wien / New York: Springer Verlag, 1996
- [2] BACH, F.W. und T. DUDA, Hg. *Moderne Beschichtungsverfahren*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2000. ISBN 9783527301171
- [3] BARBEZAT, G. und J. SCHMID. Plasmabeschichtungen von Zylinderkurbelgehäusen und ihre Bearbeitung durch Honen [online]. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 2001, (Jahrgang 62, Heft 4), 314-320. ISSN 0024-8525. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF03227334#
- [4] BAUDER, R., A. FRÖHLICH und D. ROSSI. Neue Generation des 3,0-L-TDI-Motors von Audi [online]. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 2010, (71, 10), 680-688. ISSN 0024-8525. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF03225611#
- [5] BERBERICH, N. *Tribologische Systemoptimierung Kolben / Kolbenring / Zylinderlaufbahn durch Makrokonturierung und Oberflächenmikrostrukturierung unter Einsatz gekoppelter mehrkörperdynamischer EHD-Simulation und DOE-Technik*. GfT Tribologiefachtagung, 2008
- [6] BERBERICH, N. *Tribo-System Kolbengruppe / Zylinderlaufbahn. Berechnungsmethodik zur Funktionsoptimierung*. Dissertation, Universität Kassel, 2008
- [7] BERBERICH, N. Berechnungsmethodik zur tribologischen Funktionsoptimierung im Kolben-Zylinder-System. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, 2009, (Jahrgang 70), 488ff
- [8] BERNS, H. und W. THEISEN. *Eisenwerkstoffe. Stahl und Gusseisen*. 4. bearbeitete Aufl. Berlin: Springer, 2008. ISBN 3540799575
- [9] BEULSHAUSEN, J. und J. GEIGER. *TC1: Grundlagen und Auslegung, A2.1: Simulation Verluste Gesamtsystem*. Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Low Friction Powertrain Frühjahrstagung 10.05.2012, 2012
- [10] BOBZIN, K., F. ERNST, K. RICHARDT, T. SCHLAEFER, C. VERPOORT und G. FLORES. Thermal spraying of cylinder bores with the Plasma Transferred Wire Arc

- process [online]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, (202, 18), 4438-4443. ISSN 02578972. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.surfcoat.2008.04.023#
- [11] BOBZIN, K., F. ERNST, J. ZWICK, T. SCHLÄFER, C. VERPOORT, K. NASSENSTEIN, A. SCHWENK, F. SCHREIBER, T. WENZ, G. FLORES und M. HAHN. Coating Bores of Light Metal Engine Blocks with a Nano- Composite Material using the Plasma Transferred Wire Arc Thermal Spraying Process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008
- [12] BOBZIN, K., E. LUGSCHEIDER, F. ERNST, T. SCHLÄFER, P. KNAUF, F. SCHREIBER, T. WENZ, M. BRODA, C. VERPOORT, K. NASSENSTEIN, J. ZWICK und A. SCHWENK. Coating Bores of Light Metal Crankcases. In: ASM THERMAL SPRAY SOCIETY, Hg. *Building on 100 years of success*, 15. Mai 2006
- [13] BÖHM, J., M. MICHEL, T. BEHR, M. HAHN und S. SCHWEICKERT. NANOSLIDE - Die Weiterführung der konsequenten Optimierung von Zylinderlaufbahnen bei Mercedes Benz. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2163: 6. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2012, S. 141-158. ISBN 978-3-18-092163-1
- [14] BÖHMER, J.C. und H. SCHLATTMEIER. *Technologie LDS-Honen. Honen von beschichteten Zylinderlaufbahnen*. Landau in der Pfalz, 27. Mai 2014-28. Mai 2014. Tri-bologie Symposium 2014: Schmierstoffe – Werkstoffe – Bearbeitung – Simulation
- [15] BORNEMANN, G. *Honen von gehärtetem Stahl und Kokillengrauguß mit Korund- und Diamanthonleisten*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1969
- [16] BOSSE, H. *Aspekte der Filterung in der Formmesstechnik*. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fertigungsmesstechnik. Braunschweig, 1994
- [17] BRAUCH, W., H.J. DREYER und W. HAACKE. *Mathematik für Ingenieure des Maschinenbaus und der Elektrotechnik*. 9. überarbeitete Auflage. Stuttgart: Teubner Verlag, 1995
- [18] BUCHMANN, M. *Herstellung und Optimierung von thermisch gespritzten, tribologisch wirksamen Schichtsystemen auf Leichtmetall-Zylinderlaufflächen*. Dissertation, Universität Stuttgart. Aachen: Shaker, 2002. Forschungsberichte des Instituts für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile (IFKB). ISBN 9783832208851

- [19] BURNETT, P. Relationship between oil consumption, deposit formation and piston ring motion for single-cylinder diesel engines. *SAE Technical Paper Series*, 1992, (Nr. 920089)
- [20] BYRNES, L., M. KRAMER und G. FLORES. HVOF-Coating and Honing of Cylinder Bores. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, Hg. *VDI-Berichte 1764: Zylinderlaufbahn, Hochleistungskolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2003, S. 97-110. ISBN 3-18-091764-4
- [21] CHU SUY, F. *Analyse betriebsbedingter Reibungszustände des Kurbeltriebwerkes von PKW-Motoren*. Dissertation Universität Kassel, 2008
- [22] CODDET, C., G. MONTAVON, S. AYRAULT-COSTIL, O. FRENEAUX, F. RIGOLET, G. BARBEZAT, F. FOLIO, A. DIARD und P. WAZEN. Surface Preparation and Thermal Spray in a Single Step. The PROTAL Process-Example of Application for an Aluminum-Base Substrate. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1999, (Volume 8, Nr. 2), 235-242
- [23] CZICHOS, H. und K.-H. HABIG. Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. *Tribologie-Handbuch*, 2010
- [24] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 50320, Teil 1, *Verschleiß - Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes*. Berlin: Beuth
- [25] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 4760, *Gestaltabweichungen; Begriffe, Ordnungssystem*. Berlin: Beuth
- [26] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 4288, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit*. Berlin: Beuth
- [27] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 3274, *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nennigenschaften von Tastschnittgeräten*. Berlin: Beuth
- [28] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 13565-1, *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 1: Filterung und allgemeine Meßbedingungen (Deutsche Fassung)*. Berlin: Beuth

- [29] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 13565-2, *Geometrische Produktspezifikationen (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften - Teil 2: Beschreibung der Höhe mittels linearer Darstellung der Materialanteilkurve (Deutsche Fassung)*. Berlin: Beuth
- [30] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 12085, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Motifkenngrößen*. Berlin: Beuth
- [31] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 11562, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Meßtechnische Eigenschaften von phasenkorrekten Filtern*. Berlin: Beuth
- [32] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 1342-1:2003-11, *Viskosität - Teil 1: Rheologische Begriffe*. Berlin: Beuth
- [33] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 8589-14, *Fertigungsverfahren Spanen - Teil 14: Honen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin: Beuth
- [34] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN 657, *Thermisches Spritzen - Begriffe, Einteilung: Deutsche Fassung*. Berlin: Beuth
- [35] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN ISO TS 12181-1, *Rundheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Rundheit*: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [36] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN ISO TS 12181-2, *Rundheit - Teil 2: Spezifikationsoperatoren*
- [37] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN ISO TS 12180-1, *Zylindrizität - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Zylinderform*
- [38] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN ISO TS 12180-2, *Zylindrizität - Teil 2: Spezifikationsoperatoren*
- [39] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN IEC 60050-351, *Internationales Elektronisches Wörterbuch, Teil 351: Leittechnik*
- [40] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 4287, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. Berlin: Beuth

-
- [41] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 25178-2, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen (Deutsche Fassung)*. Berlin: Beuth
- [42] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 25178-3, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 3: Spezifikationsoperatoren (Deutsche Fassung)*. Berlin: Beuth
- [43] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN EN ISO 16610-31, *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 31: Robuste Profilfilter: Gaußsche Regressionsfilter*. Berlin: Beuth
- [44] DISTLER, B. und P. ERNST. Integration von thermischen Spritzschichten für Zylinderlaufflächen in die Großserie. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2230: 7. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2014, S. 87-108. ISBN 978-3-18-092230-0
- [45] DOLLINGER, P. *Konturhoning von Zylinderlaufbahnen bei Audi*. 5. Nürtinger Honosymposium. Nürtingen, 29. März 2017
- [46] DRÖDER, K., H.-W. HOFFMEISTER, T. GROßE, M. WINTER und C. HERRMANN. Untersuchungen zum Einsatz alternativer Kühlschmierstoffe beim Honen. In: H.-W. HOFFMEISTER und B. DENKENA, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2013, S. 343-349. ISBN 3802729714
- [47] DRÖDER, K., H.-W. HOFFMEISTER, F. SCHWEIG, T. GROßE, T. SPITZNAGEL, A. WIENS und G. FLORES. Bearbeitungsstrategien beim Formhonen von Zylinderkurbelgehäusen. In: H.-W. HOFFMEISTER und B. DENKENA, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2013, S. 302-318. ISBN 3802729714
- [48] DROSSEL, W.-G., C. HOCHMUTH und R. SCHNEIDER. An adaptronic system to control shape and surface of liner bores during the honing process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2013, (Volume 62, Issue 1), 331-334
- [49] DUNAEVSKY, V.V. Analysis of distortions and conformability of piston rings. *Tribology Transactions*, 1990, (Band 33, Nr. 1), 33-40
- [50] ERNST, F. und B. DISTLER. SUMEBore. Die Pulver-basierte Plasma Beschichtung für Zylinderlaufflächen. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2163:*

6. *VDI Fachtagung mit Fachausstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2012. ISBN 978-3-18-092163-1
- [51] ESCH, T. *Einfluss der Zylindergestaltung auf die tribologischen Eigenschaften von wassergekühlten Viertakt-Verbrennungsmotoren*. Dissertation RWTH Aachen, 1991
- [52] NAGEL MASCHINEN- UND WERKZEUGFABRIK GMBH. Europäische Patentanmeldung: Verfahren und Honen von Bohrungen sowie Honmaschine hierfür. EP1815943A1
- [53] NAGEL MASCHINEN- UND WERKZEUGFABRIK GMBH. Europäische Patentanmeldung: Verfahren zum Honen von Bohrungen sowie Maschine hierfür. EP1815944A1
- [54] MASCHINENFABRIK GEHRING GMBH UND CO. Europäische Patentanmeldung: Verfahren zur Herstellung einer Bohrung und Honmaschine zur Durchführung des Verfahrens. EP1321229A1
- [55] NAGEL MASCHINEN- UND WERKZEUGFABRIK GMBH. Europäische Patentanmeldungen: Verfahren zum Honen von Bohrungen sowie Werkzeug hierfür und gehontes Werkstück. EP1790435A1
- [56] NAGEL MASCHINEN- UND WERKZEUGFABRIK GMBH. Europäische Patentschrift: Verfahren zum Honen von Bohrungen, sowie Werkzeug hierfür. EP1790435B1
- [57] EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT. *Nr. 333/2014: EU-Verordnung zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 443/2009*. 333/2014, 2014
- [58] FAHRENWALDT, H.J., V. SCHULER und J. TWRDEK. *Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. 5., vollst. überarb. Aufl. 2014. Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg, 2014. SpringerLink : Bücher. ISBN 3658031417
- [59] FEDERAL-MOGUL BURSCHEID GMBH. *Kolbenring-Handbuch*. Firmenschrift. Burscheid, 2003
- [60] FELDMANN, D. *Repetitorium der Ingenieur-Mathematik. Band 1*. 7. überarbeitete Auflage. Springe: C. Feldmann Verlag, 1990
- [61] FISCHER, U. *Untersuchung des Verformungsverhaltens der Grundlagergasse am Motorgehäuse eines Mehrzylindermotors unter statischer und dynamischer Belastung*. Dissertation, Technische Hochschule Zwickau, 1991

- [62] FISCHER, U. Laserlegieren zur Laufflächenbildung bei Aluminium-Motorblöcken. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, 2001, (Jahrgang 62, Nr. 3), 250-253
- [63] FLOR, S. *Beitrag zum Verschleißverhalten von plasmagespritzten Zylinderlaufflächen im Diesel-Motorbetrieb*. Dissertation, Universität Dortmund, 2002
- [64] FLORES, G. Spanendes Verfahren zur Freilegung von Si-Kristallen an Kurbelgehäusen aus AlSi17Cu4Mg. In: E. SALJÉ und R. PAULMANN, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. 56. Ausgabe. Essen: Vulkan-Verlag, 1990, S. 427-437. ISBN 3-8027-2685-5
- [65] FLORES, G. *Grundlagen und Anwendungen des Honens*. Essen: Vulkan-Verlag, 1992
- [66] FLORES, G. Honbearbeitung von Pleuelstangen. Funktionssicherheit, Qualitätsbegriffe und Fertigungstechnologie. In: VDI WISSENSFORUM IWB GMBH, Hg. *VDI-Berichte 1906: Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2006. ISBN 3-18-091906-X
- [67] FLORES, G., T. ABELN und U. KLINK. Funktionale Endbearbeitung von Zylinderbohrungen aus Gusseisen. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, 2007, (Jahrgang 68), 181ff
- [68] FLORES, G. und T. BIRKNER. Positionshonen statt Feinbohren. *VDI-Z 149, Nr. 4*, April 2007
- [69] FLORES, G., M. BUGSCH, T. BASTUCK und S. BRAUNS. Tribologische Optimierung von Großmotoren - Geringere Emissionen und längere Wartungsintervalle. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2230: 7. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2014, S. 269-282. ISBN 978-3-18-092230-0
- [70] FLORES, G. und E. HAMPP. Funktion und Anwendung superharter Schneidstoffe im Honprozess. In: H.-W. HOFFMEISTER und B. DENKENA, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2011, S. 273-285. ISBN 978-3802729591
- [71] FLORES, G., H.-W. HOFFMEISTER und C. SCHNELL. Vorbehandlung und Honen thermischer Spritzschichten. In: H.-W. HOFFMEISTER und B. DENKENA, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2007, S. 290-297. ISBN 978-3802729416

- [72] FLORES, G., U. KLINK und T. ABELN. Honen von Funktionsformen in Zylinderkurbelgehäusen. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 1994: 4. VDI Fachtagung Zylinderlaufbahnen, Kolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2008, S. 79-90. ISBN 978-3-18-091994-2
- [73] FLORES, G., A. SCHWENK und C. SCHNELL. Prozesskette zur Herstellung thermisch gespritzter Zylinderbohrungen - Kosten- und Funktionsvorteile durch innovative Fertigungstechnik. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2109: 5. VDI Fachtagung mit Fachausstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2010, S. 191-202. ISBN 978-3-18-092109-9
- [74] FLORES, G., A. WIENS, M. LAHRES und H.-W. HOFFMEISTER. Formhonen. Neues Optimierungspotential für den Hubkolbenmotor. *ATZ produktion*, 2011-01, 38-43
- [75] FORD, M. und M. FISHER. Method for Coating Combustion Engine Cylinders by Plasma Transferred Wire Arc Thermal Spray. *MSE 121*, April 2010, (30. Jahrgang)
- [76] FÜSSER, H.-J., K. HOLDIK, M. WALTHER, S. TOMASCHKO, G. SCHULZ, V. LAGEMANN, S. LANDSBECK und K. ROHWER. Abschlussbericht zu den Arbeiten der Daimler AG im Verbundprojekt: Nanokristalline Compositebeschichtungen für Zylinderlaufbahnen mit nanostrukturierter Oberfläche und Verschleißvorhersage für hochbelastete Benzin- und Dieselmotoren - NaCoLab. Teilprojekt der Daimler AG: Entwicklung von verschleißfesten, nanokristallinen Laufbahnschichten mittels LDS für einen Hochleistungs-Dieselmotor und die Entwicklung von Methoden zur rechnerischen und experimentellen Bewertung von geeigneten und optimierten Laufbahnvarianten. In:
- [77] GADOW, R. und D. LOPEZ. Überflammspritzen (HVOF) von metallurgischen und cermetischen Schichten für Zylinderlaufflächen. In: GESELLSCHAFT FÜR TRIBOLOGIE E.V., Hg. *Reibung, Schmierung und Verschleiß*, 2006
- [78] GADOW, R., M.J. RIEGERT-ESCRIBANO und M. BUCHMANN. Residual Stress Analysis in Thermally Sprayed Layer Composites, Using the Hole Milling and Drilling Method. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2005, (Volume 14 (1)), 100-108
- [79] GAND, B. und H.J. SALENBAUCH. AluThinFer-Zylinderlaufflächen - Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs und des Verschleißverhaltens für Motoren mit niedriger und

- hoher thermo-mechanischer Beanspruchung. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2109: 5. VDI Fachtagung mit Fachausstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2010, S. 159-176. ISBN 978-3-18-092109-9
- [80] GOHL, M. Massenspektrometrisches Verfahren zur dynamischen Online-Messung der Ölemission von Verbrennungsmotoren. Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 1021, 2004
- [81] GOLLOCH, R. *Untersuchungen zur Tribologie eines Dieselmotors im Bereich Kolbenring / Zylinderbuchse*. Dissertation, Universität Hannover, 2001
- [82] GORY, N. *Messung der Honnormalkraft beim Formhonen*. Braunschweig, 10. April 2014
- [83] GREEN, S., W. HAYARD und R. TYRRELL. Analysis of bore distortions and design for low oil consumption. Autotech 1989 Congress, Paper C399, 1989, S. 132-138
- [84] GRIMM, H. und U. KLINK. Honen konischer Bohrungen mit Diamant auf Groß-Maschinen. *Sonderdruck aus Industrie Diamanten Rundschau IDR 7*, 1973
- [85] GROßE, T. *Formhonen mit piezo-hydraulischem Honwerkzeug*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan-Verlag, 2017
- [86] HAASIS, G. *Untersuchungen über wirtschaftliches Honen*. Dissertation Technische Universität Stuttgart, 1955
- [87] HAASIS, G. Möglichkeiten der Optimierung beim Honen. *Werkstatt und Betrieb*, 1975, (Ausgabe 108, Nr. 2)
- [88] HAASIS, G. und U.-P. WEIGMANN. Neues Honverfahren für umweltfreundliche Verbrennungsmotoren. Carl Hanser Verlag, München. *Werkstatt und Betrieb*, 1999, 29-35
- [89] HAHN, M., C. BAUER, R. THEISSMANN, B. GLEISING, W. DUDZINSKI und A. FISCHER. The impact of microstructural alterations at spray coated cylinder running surfaces of diesel engines – Findings from motor and laboratory benchmark tests [online]. *Wear*, 2011, (Heftnummer 9-10), 2599-2609. ISSN 00431648. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.wear.2011.01.090#

- [90] HAHN M., THEISSMANN R., GLEISING B., DUDZINSKI W., FISCHER A. Microstructural Alterations within Thermal Spray Coatings during Highly Loaded Diesel Engine Tests. *Wear*, 2009, (267), 916-924
- [91] HALSBAND, M. *Entwicklung reibungsoptimierter Kolbengruppen unter Anwendung spezifischer Meßverfahren*. Dissertation, Universität Hannover, 1994
- [92] HAMAI, K., T. GOTO, T. MASUDA und T. ARAI. Present status and future direction of engine tribology at Nissan. Paper XVIII. "Vehicle Tribology", Proceedings of the 17th Leeds-Ion Symposium on Tribology, 4. September 1990
- [93] HANNEMANN, F.H. *Gesamtheitlicher Ansatz zur Bewertung von Oberflächenstrukturen der Paarung Kolbenring/Zylinderlaufbahn*. Dissertation, Universität Kassel. Kassel: Inst. für Maschinenelemente und Konstruktionstechnik, 2013. Fortschrittsberichte Strukturanalyse und Tribologie. Bericht 44. ISBN 3939124230
- [94] HERCKE, T. Umfassende 3D-Oberflächenbewertung von Honstrukturen. *MTZ Motor-technische Zeitschrift*, 2009, (Jahrgang 70, Nr. 10)
- [95] HEUBERGER, A. *Neue Werkstoffe und Oberflächengestaltung bei Zylinderlaufbahnen zur Absenkung der Reibung der Kolbengruppe bei Verbrennungsmotoren*. Dissertation, Universität Kassel. Kassel: Inst. für Maschinenelemente und Konstruktionstechnik, 2007, c 2007. Fortschrittsberichte Strukturanalyse und Tribologie. Bericht 23. ISBN 3939124044
- [96] HOFFMEISTER, H.-W. *Prozessintegrierte Qualitätsprüfung beim Honen zylindrischer Formelemente*. Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, TU Braunschweig, 1997
- [97] HOFFMEISTER, H.-W., K. DRÖDER, T. GROßE, A. FRICKE und F. SCHWEIG. Neue Ansätze und Leistungspotenziale für das Bohrungshonen. In: T. TAWAKOLI, Hg. *Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung 2014. Neue Entwicklungen und Trends aus Forschung und Praxis*. Stuttgart: Vulkan-Verlag, 2014, 11.1-11.19. ISBN 978-3-8027-2979-9
- [98] HOFFMEISTER, H.-W., T. GROßE und A. GERDES. Investigation of the Influence of Different Process Setting Parameters on the Surface Formation at Honing of Thermally Sprayed Layers [online]. *Procedia CIRP*, 2012, **1**, 371-376. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2012.04.066#

- [99] HOFFMEISTER, H.-W., T. GROßE, C. SCHNELL und A. GERDES. Untersuchungen zum Honen thermischer Spritzschichten für Leichtmetall-Zylinderkurbelgehäuse. In: H.-W. HOFFMEISTER und B. DENKENA, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2011, S. 287-301. ISBN 978-3802729591
- [100] HÖHNE, L. *Honen technischer Keramiken*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan-Verlag, 1998. ISBN 3-8027-8640-8
- [101] HÜBNER, M. *Untersuchung zur Verringerung von Reibung und Ölverbrauch des tribologischen Systems Kolben/Ringe/Zylinderlaufbahn eines Pkw-Ottomotors*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2013. ISBN 3843912882
- [102] INOUE, T. Study of transient oil consumption of automotive engine. *SAE Technical Paper Series*, 1989, (Nr. 892110)
- [103] JENDRIZA, D.J. *Technischer Einsatz neuer Aktoren. Grundlagen, Werkstoffe, Designregeln und Anwendungsbeispiele*. Renningen-Malmsheim: Expert-Verlag, 1995
- [104] JÖHREN, P. Einrichtung zur Ermittlung von Zylinderverzügen und ihre Ursachen. Fachschrift K16, 1973
- [105] JOSEF, O. *Messung der dynamischen Zylinderdeformation in gefeuerten Verbrennungsmotoren*. Dissertation, Universität Hannover. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2001. ISBN 3-18-346912-X
- [106] JUCHEM, H.O. Entwicklungsstand beim Honen von Bohrungen in metallischen Werkstücken mit Diamant und CBN. *Industriediamanten Rundschau (IDR)* 18, Nr. 3, 1984, 173-185
- [107] JÜNEMANN, H. ET AL. *Tribometrie*. Renningen-Malmsheim: expert, 1997
- [108] KAINER, K.U. *Metallische Verbundwerkstoffe*. Weinheim: DGM; Wiley-VCH, 2003. ISBN 9781280560767
- [109] KARRAR, E. *Untersuchungen zum Reibverhalten und Ölverbrauch der Kolbengruppe von Verbrennungsmotoren*. Dissertation, RWTH Aachen, 2009
- [110] KAWAHARA, Y. ET AL. Reduction in lubricant oil consumption of air-cooled gasoline engines. *Mitsubishi Heavy Industries: Technical Review*, 1991, (Band 28, Nr. 2), 92-97

- [111] KESSEN, U. *Tribologische untersuchungen an der Kolbengruppe eines Dieselmotors bei hohen Mitteldrücken*. Dissertation Universität Hannover, 1999
- [112] KLIE, B. *Schneidmitteluntersuchungen beim Formhonen von Zylinderbohrungen*. Braunschweig, 24. Februar 2012
- [113] KLINK, U. und G. FLORES. Laserstrukturieren von Zylinderlaufbahnen. 9. Int. Braunschweiger Feinbearbeitungskolloquium, Tagungsband 9, 1999, 5.1-1.10
- [114] KLINK, U. und G. FLORES. Honen. Fortschritte durch optimierte Werkzeuge und Prozesse. *Sonderdruck aus VDI-Z, Heft 6 und 7*, 2001
- [115] KLOCKE, F. und W. KÖNIG. *Fertigungsverfahren. Schleifen, Honen, Läppen*. 4. Auflage, VDI Buch. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2005. Band 2. ISBN 978-3-540-27699-9
- [116] KOCH, F. *Untersuchungen zur Deformation von Zylinderrohren in Verbrennungsmotoren mit einem neuen Messverfahren*. Dissertation RWTH Aachen, 1996
- [117] KÖHLER, E. und R. FLIERL. *Verbrennungsmotoren. Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors ; mit 25 Tabellen*. 5., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, c 2009. ATZ-MTZ Fachbuch. ISBN 978-3-8348-0490-7
- [118] KÖHLER, E., I. LENKE und J. NIEHUES. LOKASIL. eine bewährte Technologie für Hochleistungsmotoren - im Vergleich zu anderen Konzepten. In: VDI WISSENSFORUM IWB GMBH, Hg. *VDI Berichte 1612: Zylinderlaufbahn, Hochleistungskolben, Pleuel*. München: VDI Verlag GmbH, 2001
- [119] KÖHLER, E., J. NIEHUES und B. SOMMER. *Vollaluminium-Zylinderkurbelgehäuse - Aluminium-Zylinderlaufflächen*. Gießereipraxis, 2005
- [120] KOMPA, A. *Untersuchung des tribologischen Verhaltens des Systems Kolbenring gegen Zylinderlauffläche mittels Modelltests*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2003
- [121] KOPP, A. *Kolbengruppe im Fokus der Entwicklung*. In: Konstruktion Nr. 1/2, IW-Teil, S. 4-5, 2005
- [122] KRAUSE, S. *Massenspektrometrisches Verfahren zur Charakterisierung der Ölverdampfung im Brennraum von Ottomotoren*. Dissertation Universität Hamburg-Harburg, 2009

- [123] KRUGGEL, O. Entwicklung eines Messverfahrens zur Feststellung der Zylinderverformung an Verbrennungsmotoren. Forschungsbericht der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V., 2009
- [124] KÜBELSTEIN, G., P. STOCKER und F. RÜCKERT. SILITEC. sprühkompaktierte Zylinderlaufbuchsen aus PM-Aluminium. In: VDI WISSENSFORUM IWB GMBH, Hg. *VDI Berichte 1612: Zylinderlaufbahn, Hochleistungskolben, Pleuel*. München: VDI Verlag GmbH, 2001
- [125] KUHN, T. *Messung der Zylinderverformung von Aluminiumkurbelgehäusen für Dieselmotoren*. Dissertation, Universität Hannover, 2001
- [126] LANGE, D., G. KAPPMAYER, H.-W. HOFFMEISTER, T. WEBER und E. WESTKÄMPER. *Sensorik und Modellbildung beim Schleifen und Honen*. Hannover, 1996. 2. Industrieseminar des Sonderforschungsbereiches
- [127] LAPIN, S. N. , ET AL. Neue Honköpfe zur Bearbeitung nichtrunder Bohrungen mit polygonalem Profil. Übersetzung B. Barth, Technische Informationen, 1993
- [128] LECHTAPE-GRÜTER, R. *Kolbenringdynamik - Dreidimensionale Finite-Elemente Bewegungssimulation unter Berücksichtigung hydrodynamischer und gasdynamischer Wechselwirkungen*. Dissertation, RWTH Aachen, 1995
- [129] LEE, J. *Fundamental study of honing*. Dissertation, University of Massachusetts: UM-I, 1991
- [130] LÖNNE, K. *Veränderung der statischen Zylinderverzüge durch den Motorbetrieb*. Fachschrift D7, Goetze AG, Burscheid, 1980
- [131] LÖNNE, K. und R. ZIEMBA. Das GOETZE Zylinderverzugsmesssystem und Möglichkeiten zur Reduzierung der Zylinderverzüge. Fachschrift D11, 1988
- [132] LÖNNE, K. und R. ZIEMBA. The Goetze cylinder distortion measurement system and the possibilities of reducing cylinder distortions. *SAE Technical Paper Series*, 1988, (Nr. 880142)
- [133] LUGSCHEIDER, E. und F.-W. BACH. *Handbuch der thermischen Spritztechnik. Technologien - Werkstoffe - Fertigen*. Düsseldorf: DVS-Verlag, 2002. ISBN 9783871551864
- [134] MA, M.-T., L. SHERRINGTON und E.-H. SMITH. Analysis of lubrication and friction for a complete piston-ring pack with an improved oil availability model. Procee-

- dings of the Institution of Mechanical Engineers. *Journal of Engineering Tribology*, 1997, (Band 211, Nr. J1), 1-28
- [135] MAASSEN, F., J. DOHMEN, S. PISCHINGER und M. SCHWADERLAPP.
Reibleistungsreduktion – Konstruktive Maßnahmen zur Verbrauchseinsparung. In: SPRINGER PROFESSIONAL, Hg. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*: Springer Verlag, 2005, S. 592-597
- [136] MAASSEN, F., F. KOCH, M. SCHWADERLAPP, T. ORTJOHANN und J. DOHMEN. *Analytical and Empirical Methods for Optimization of Cylinder Liner Bore Distortion*. SAE Technical Paper Series, Nr. 2001-01-0569, 2001
- [137] MAHLE GMBH, Hg. *Zylinderkomponenten. 1. ATZ/MTZ-Fachbuch*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009
- [138] MARTIN, K. Beeinflussung der Werkstückoberfläche beim Kurzhubhonen. *Maschinenmarkt Nr. 81*, (1975), 762-764
- [139] MARTIN, K. Der Werkstoffabtrag beim Feinbearbeitungsverfahren Honen. *Maschinenmarkt Nr. 82*, 1976, 1074-1078
- [140] MASKUS, H.-P. *Beitrag zur prozessintegrierten Qualitätsprüfung und zur Prozessregelung beim Honen*. Dissertation TU Braunschweig, 1990
- [141] MASTRANGELO, G., D. MICELLI und D. SACCO. Extremes Downsizing durch den Zweizylinder-Ottomotor von Fiat [online]. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 2011, (72,2), 88-95. ISSN 0024-8525. Verfügbar unter: doi:10.1365/s35146-011-0024-4#
- [142] MAURIZI, M., E. TOMANIK und E. REJOWSKI. DLC coated liners for fuel savings. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2230: 7. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2014, S. 135-146. ISBN 978-3-18-092230-0
- [143] MAY, R.J. *Strukturanalyse der Zylinderbohrungsverzüge eines Vollaluminiummotors*. Dissertation, Universität Hannover, 2000
- [144] MAYER, M. Hochleistungshonen: Der Weg zur Kostenreduzierung in der Feinbearbeitung - Positionshonen ersetzt Feinbohren. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2109: 5. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kol-*

- ben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich.* Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2010, S. 125-132. ISBN 978-3-18-092109-9
- [145] MERKER, G.P. *Möglichkeiten und Grenzen moderner Berechnungsverfahren für Hochleistungs-Dieselmotoren.* Dieselmotorentechnik: Symposium an der Technischen Akademie Esslingen, S. 168-196, 1992
- [146] MEYER, K. und H. KLOß. *Reibung und Verschleiß geschmierter Reibsysteme.* In: Reihe Technik. Ehningen/Böblingen: expert, 1993
- [147] MIERBACH, A. Berechnung der Radialdruckverteilung von Kolbenringen in verzogenen Zylinderbuchsen. Fachschrift K15, Goetze AG, Burscheid, 1980
- [148] MITOSUGI, H., K. NAGOSHI, M. EBINA und S. FURUHAMA. Study on cylinder bore deformation of dry cylinder liner in engine operation. *JSAE Review 17 Nr. 2*, 1996
- [149] MÖNDEL, A., M. BLASZCZYK, K. SEIDEL, G. ZIEGLER, P. BERLET, A. KNAPP, A. BRINK, M. SCHERGE, A. GRAMM und G. GRAMM. NanoFerro - Galvanisch abgeschiedene Eisenbeschichtung auf Zylinderlaufbahnen. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2230: 7. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel.* Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2014, S. 147-164. ISBN 978-3-18-092230-0
- [150] MÖNDEL, A., P. DOLLINGER, G. ZIEGLER, A. BRINK, M. SCHERGE, G. GRAMM, M. KLEINDIENST, H. KUBACH und P. BERLET. Untersuchungen an Zylinderlaufbahnen mit galvanisch aufgebrachtener Eisenbeschichtung. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2163: 6. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel.* Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2012, S. 189-206. ISBN 978-3-18-092163-1
- [151] MÖNDEL, A. ET. AL. Analysen zur Kolbenbewegung eines Hochdrehzahlmotors unter der Berücksichtigung der Anregungsquellen im Kurbeltrieb. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2109: 5. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich.* Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2010. ISBN 978-3-18-092109-9
- [152] MOSER, A. Vermessungen an Zylinderbohrungen von Verbrennungskraftmaschinen. *ATZ*, 1966, (68), 277-279

- [153] MÜLLER, R. Zur Frage des Formfüllvermögen von Kolbenringen in von der Kreisform abweichenden Bohrungen gleicher Umfangslänge. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, 1970, (Jahrgang 31, Nr. 2), 79-82
- [154] MUSHARDT, H. Honen von Bohrungen. Grundlagen und Anwendungsbeispiele. In: E. SALJÉ, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 1982, S. 354-363. ISBN 3-8027-2657-X
- [155] MUSHARDT, H. *Modellbetrachtungen und Grundlagen zum Innenrundhonen*. Dissertation TU Braunschweig, 1986
- [156] N., N. *BALINIT® C STAR* [online]. *Ideal für weiche Grundwerkstoffe* [Zugriff am: 30. Oktober 2015]. Verfügbar unter: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bde/ger/01-products-services/02-balinit-coatings/055-balinit-c-star/indexW3DnavidW261.php#>
- [157] N., N. *Formline - Formmesstechnik* [online] [Zugriff am: 30. Oktober 2015]. Verfügbar unter:
[http://www.jenoptik.com/cms/jenoptik.nsf/res/FORMLINE_DE_10064359.pdf/\\$file/FORMLINE_DE_10064359.pdf#](http://www.jenoptik.com/cms/jenoptik.nsf/res/FORMLINE_DE_10064359.pdf/$file/FORMLINE_DE_10064359.pdf#)
- [158] N., N. Incometer. Druckschrift der PAT Messtechnik GmbH
- [159] N., N. *open deck or closed deck* [online] [Zugriff am: 21. April 2017]. Verfügbar unter: <https://www.scooby.net.com/general-technical-10/963877-open-deck-or-closed-deck.html#>
- [160] N., N. *PICA Power Piezoaktoren* [online]. *Vorgespannte Hochlast-Piezoaktoren (HVPZT) mit Sensoroption*. Datenblatt P-225. Verfügbar unter:
<http://www.physikinstrumente.de/produkt-detailseite/p-225-101750.html#>
- [161] N., N. *Thermische Spritzbeschichtungen - Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (HVOF)* [online] [Zugriff am: 28. Juli 2016]. Verfügbar unter:
<http://www.gfe.com/produktbereiche/thermische-spritzbeschichtungen/thermische-spritzverfahren/hochgeschwindigkeits-flammspritzen-hvof/#>
- [162] N., N. *Kolbenring-Handbuch*. Goetze AG, Druckschrift Nr. 893800-08/89. Burscheid, 1989
- [163] N., N. *Honilo 981* [online]. Castrol Product Data (german version), 2003. 1 Februar 2003 [Zugriff am: 8. Dezember 2015]. Verfügbar unter: http://www.industrieschmierstoffe.de/download/honilo_981_german.pdf#

- [164] N., N. Die ganze Welt der Nano- und Mikropositionierung. Gesamtkatalog, Fa. Physikinstrumente (PI) GmbH & Co. KG, 2007
- [165] N., N. *Operating manual and Functional Description of Graphical User Interface* [online]. *V-INCOMETER with EC110 and Software INCOWIN*. Software version V02.103.00 (2007), 2007
- [166] N., N. Dynamische Messsysteme zur Formbestimmung und Oberflächeninspektion in Motoren. Produktinformation Incometer und Topometer. HOMMEL-ETAMIC GmbH, 2009
- [167] N., N. *Transor Compact Filter* [online]. *Filter einer neuen Generation*. Produktbroschüre TCF Filteranlagen (deutsche Fassung), 2010 [Zugriff am: 8. Dezember 2015]. Verfügbar unter:
http://www.transor.de/fileadmin/user_upload/pdf/TCF_Broschuere_2010_d.pdf#
- [168] N., N. *Reibungsverlust minimiert durch NANOSLIDE Technologie* [online]. *Mercedes-Benz Innovation: NANOSLIDE für weniger Verbrauch*, 2011 [Zugriff am: 11. Dezember 2016]. Verfügbar unter:
<http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Reibungsverlust-minimiert-durch-NANOSLIDE-Technologie-Merced.xhtml?oid=9915751#>
- [169] N., N. *Prozessmesstechnik und Automation. Messsysteme zur Prozessüberwachung und Qualitätssicherung in Fertigung, Montage- und Prüfstandstechnik*. Produktkatalog Fa. Kistler, 2012
- [170] N., N. Superabrasives Grit Sizes. Approximate Relationship Between FEPA and other National Diamond and CBN Grit Size Designations, Letzter Aufruf: 29. November 2015 [Zugriff am: 29. November 2015]. Verfügbar unter: www.fepa-abrasives.org#
- [171] N., N. *Lichtbogendrahtspritzen* [online]. Praxair Surface Technologies, 2016 [Zugriff am: 11. Dezember 2016]. Verfügbar unter: <http://www.praxair-gmbh.de/lichtbogendrahtspritzen/#>
- [172] NAERMAN, M.S. und P.M. IVOCKIN. Das Diamanthonen nichttrunder Bohrungen. Übersetzung B. Barth, Technische Informationen. *Stanki i instrument, Nr. 11*, 1967, 40-41
- [173] NEUGEBAUER, R., C. HOCHMUTH und R. SCHNEIDER. Adaptronisches Formhonen - Fertigungsverfahren zur Kompensation von Zylinderverzügen. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2163: 6. VDI Fachtagung mit Fachaussstel-*

- lung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2012, S. 225-238. ISBN 978-3-18-092163-1
- [174] NEUKIRCHNER, H., E. SCHNEIDER, A. KIESEL und R. BUDDE. Aktuelle Trends im Kurbeltrieb von Verbrennungsmotoren. In: VDI WISSENSFORUM IWB GMBH, Hg. *VDI-Berichte 1906: Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2006, S. 1-30. ISBN 3-18-091906-X
- [175] NEUBER, H.-J., J. KAHRSTEDT, H. JELDEN, H.-J. ENGLER, R. DORENLAMP, S. JAUNS-SEYFRIED und A. KRAUSE. *Die neue modulare TDI®-Generation von Volkswagen*. Volkswagen AG (Wolfsburg). Wien, 26. April 2012. 33. Internationales Wiener Motorensymposium
- [176] FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. Offenlegungsschrift: Honwerkzeug und Verfahren zum Honen der Innenfläche einer Bohrung in einem Werkstück. Erfinder: C. HOCHMUTH, D. BRÄU UND H.-J. ROSCHER. Anmeldung: 23. November 2010. DE102010052271A1
- [177] GEHRING GMBH & CO. KG. Offenlegungsschrift: Maschine zur Erzeugung nicht zylindrischer Bohrungsflächen. DE102007038123A1
- [178] DAIMLER AG; GEHRING TECHNOLOGIES GMBH. Offenlegungsschrift: Verfahren zum Bearbeiten einer Zylinderbohrung eines Verbrennungsmotors. Erfinder: G. FLORES, T. HERCKE, M. LAHRES, A. WAGNER, A. WARZOK UND A. WIENS. Anmeldung: 15. November 2011. DE102011118588A1
- [179] GEHRING GMBH & CO. KG. Offenlegungsschrift: Verfahren zum Zustellen eines Honwerkzeuges und Vorrichtung zum ausführen des Verfahrens. Anmeldung: 7. Juni 1984. Deutschland. DE3421193A1
- [180] DAIMLER AG; GEHRING TECHNOLOGIES GMBH. Offenlegungsschrift: Verfahren zur Erzeugung einer nicht zylindrischen Innenfläche einer Bohrung durch Formbohren oder Honen. Erfinder: G. FLORES, M. LAHRES, K. LITTY, R. QUAST, A. WAGNER UND A. WIENS. DE102009050612 A1
- [181] DAIMLER AG; GEHRING GMBH & CO. KG. Offenlegungsschrift: Verfahren zur Herstellung von Bohrungen in Gehäusen; insbesondere von Zylinderbohrungen für Hubkolbenmaschinen in Zylinderkurbelgehäusen. Anmeldung: 25. Mai 2007. DE102007024569A1

- [182] NAGEL MASCHINEN- UND WERKZEUGFABRIK GMBH. Offenlegungsschrift: Vorrichtung zum Finishen von Werkstücken mit nicht rotationssymmetrischer Form. DE2005922A
- [183] GEHRING TECHNOLOGIES GMBH. Offenlegungsschrift: Werkzeug und Verfahren zum Glätten von Bohrungen. Erfinder: G. FLORES, A. WAGNER UND E. BAUMGARTNER. Anmeldung: 28. Juli 2010. DE102010032453A1
- [184] VOLKSWAGEN AG. Offenlegungsschrift: Werkzeugmaschine zum Bearbeiten einer elliptischen Bohrung. DE4019704A1
- [185] NISSAN MOTOR CO LTD. Patent Abstracts of Japan: Hole machining device. JP11267960A
- [186] MAZDA MOTOR CORP. Patent Abstracts of Japan: Machining Method for engine cylinder. JP62287965
- [187] AUDI AG. Patentschrift: Brennkraftmaschine. Erfinder: G. ZIEGLER. DE102013013943 B3
- [188] Patentschrift: Cutting tools and roughened articles using surface roughening methods. Erfinder: M. IIZUMI UND K. NISHIMURA. WO2006061710 A1
- [189] NISSAN MOTOR COMPANY, LIMITED. Patentschrift: Cylinder inside prespray processing method. Erfinder: H. TAKAHASHI, M. CHUUBACHI UND K. HASEGAWA. EP1334268 B1
- [190] Patentschrift: Honing Plate. Erfinder: C. L. YOTHER. US4117633 A
- [191] NAGEL MASCHINEN- UND WERKZEUGFABRIK GMBH. Patentschrift: Honmaschine. Erfinder: W. NAGEL UND Nagel P. Anmeldung: 10. März 1978. Deutschland, USA. DE2810322C2
- [192] ELGAN-DIAMANTWERKZEUGE GMBH & CO. KG. Patentschrift: Honverfahren und Honwerkzeug. Erfinder: F.-A. XAVIER, O. BACHMANN, F. KRANICHSFELD UND H. RAUSCHER. WO2014146919 A1
- [193] TOYOTA JIDOSHA KABUSHIKI KAISHA. Patentschrift: Jig and method for processing cylinder block. Erfinder: Tomoyuki S., Takahiro H., Kazuhiro A. und Kazuki W. EP2072184 B1

- [194] GEHRING TECHNOLOGIES GMBH. Patentschrift: Maschine zur Erzeugung nicht zylindrischer Bohrungsflächen. Erfinder: A. DOLLA, G. FLORES, U. KLINK UND K. LITTY. DE102007038123 B4
- [195] GEHRING TECHNOLOGIES GMBH. Patentschrift: Metallisches Substrat mit einer zum Aufbringen einer thermischen Spritzschicht geeigneten Oberfläche. DE202009014180 U1
- [196] NAGEL MASCHINEN- UND WERKZEUGFABRIK GMBH. Patentschrift: Method and apparatus for honing bore holes. Erfinder: W. NAGEL UND U.-P. WEIGMANN. EP1815943 A1
- [197] Patentschrift: Oberflächenkonditionierung für thermische spritzschichten. Erfinder: J. BOEHM, M. GRUENER, M. HARTWEG, T. HERCKE, K. HOLDIK, P. IZQUIERDO, W. PELLKOEFER UND D. SCHILLING. WO2007087989 A1
- [198] ELGAN DIAMANTWERKZEUGE GMBH. Patentschrift: Verfahren und Werkzeug zum Vorbehandeln einer Bohrungsfläche. Erfinder: J. SCHMID. DE10139516 A1
- [199] GÜHRING OHG; HONSEL AG. Patentschrift: Verfahren und Werkzeug zur Erzeugung einer Oberfläche vorbestimmter Rauheit. Erfinder: H. AST, L. BOZKURT, B. GAND, F. ORLAMÜNDER, H. REIMANN UND P. SOMMERFELDT. DE102008058452 A1
- [200] Patentschrift: Verfahren zum Aufräumen von Oberflächen für die spätere Aufbringung von Spritzschichten. Erfinder: Neufang, O. et al. DE102007023418A1
- [201] DAIMLER AG. Patentschrift: Verfahren zum Behandeln einer Oberfläche. Erfinder: M. GRÜNER, T. HAUG, M. LAHRES, O. METHNER, N. MILLER UND O. NEUFANG. DE102008022225 A1
- [202] BMW AG. Patentschrift: Verfahren zum Herstellen einer Brennkraftmaschine und nach diesem Verfahren hergestellte Brennkraftmaschine. Erfinder: B. BERBERICH, A. FISCHERSWORRING-BUNK, T. GROSS UND W. KORNPÖBST. DE102007032915 A1
- [203] DAIMLER AG; GEHRING GMBH & CO. KG. Patentschrift: Verfahren zur Erzeugung einer nichtzylindrischen Bohrungsfläche in einem Werkstück durch Formhonen. Erfinder: A. DOLLA, G. FLORES, M. GRÜNER, U. KLINK, M. LAHRES UND A. WIENS. DE102007063567 A1

- [204] GEHRING GMBH & CO. KG. Patentschrift: Verfahren zur formändernden Bearbeitung einer Bohrung. Erfinder: G. FLORES, R. FRÖSCHLE, U. KLINK, K. LITTY UND A. WIENS. DE102006062665 A1
- [205] GEHRING GMBH & CO. KG. Patentschrift: Verfahren zur Herstellung einer Bohrung. Erfinder: G. FLORES UND U. KLINK. EP1321229 B1
- [206] FORD-WERKE GMBH. Patentschrift: Verfahren zur Herstellung verschleißfester Beschichtungen auf einem Metallgrundkörper und eine mit diesem Verfahren hergestellte Beschichtung. Erfinder: Veerport, C. M. et al. EP1854903 A1
- [207] Patentschrift: Verfahren zur Oberflächenbearbeitung der Innenseite von Zylinderbohrungen. Erfinder: Izquierdo, P. et al. DE19840117 C2
- [208] DAIMLER AG. Patentschrift: Verfahren zur Vorkonditionierung einer zu beschichtenden Oberfläche. Erfinder: C. M. ERDMANN UND E.A. ÖZDENIZ. DE102008024313 A1
- [209] GEHRING GMBH & CO. KG. Patentschrift: Vorrichtung zum Honen nicht zylindrischer Werkstückflächen. Erfinder: C. W. GEHRING. DE1045841B
- [210] GEHRING TECHNOLOGIES GMBH. Patentschrift: Vorrichtung zur Erzeugung einer nicht zylindrischen Innenfläche einer Bohrung. Erfinder: M. LAHRES, A. WIENS, M. HARTWEG, U. KLINK, G. FLORES UND A. WAGNER. DE102008064592 B4
- [211] GEHRING TECHNOLOGIES GMBH. Patentschrift: Werkzeug zum Positionshonen. Erfinder: E. BAUMGARTNER, G. FLORES UND J. RICHTER. WO2012013425 A1
- [212] PISCHINGER, S., J. DOHMEN, F. MAASSEN und E. KARRAR. Potentiale zur Reibleistungsreduktion der Kolbengruppe. ATZ/MTZ Konferenz - Reibungsminimierung, Esslingen, 2009
- [213] PRIEBSCHE, H. und H. HERBST. Simulation of effects of piston ring parameters on ring movement, friction, blow-by and LOC. AVL List GmbH. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, November 1999, (Jahrgang 60)
- [214] PUDENZ, K. *Neuartiges adaptronisches Werkzeug* [online]. *drei Prozent Kraftstoff durch Honen sparen*, 10. April 2012 [Zugriff am: 8. Dezember 2015]. Verfügbar unter: <http://www.springerprofessional.de/neuartiges-adaptronisches-werkzeug-drei-prozent-kraftstoff-durch-honen-spahren-15707/3952492.html#>

- [215] REHL, A., H.-J. WEIMAR, M. SCHERGE, R. BUSCHBECK und C. KLIMESCH. Einfluss der Topographie von Aluminium-Silizium-Zylinderlaufflächen auf Reibungs- und Verschleißvorgänge im Kolbensystem. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2163: 6. VDI Fachtagung mit Fachausstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2012, S. 239-250. ISBN 978-3-18-092163-1
- [216] REHL, A., A. WILD, M. FAHR und U. MORAWITZ. Potentiale zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs durch Reduzierung der Reibung im Kolbensystem eines Motors. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2230: 7. VDI Fachtagung mit Fachausstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2014. ISBN 978-3-18-092230-0
- [217] REJOWSKI, E.D., P. MORDENTE, M.F. PILLIS und T. CASSERLY. Application of DLC Coating in Cylinder Liners for Friction Reduction. *SAE Technical Paper Series*, 2012, (Nr. 2012-01-1329)
- [218] RING, F. und S. THEIß. *TC3: Kolben/Liner. M2.1: Kolbengruppe / Reibungsreduziernde Oberflächen*. Frankfurt am Main, 11. Mai 2012. Low Friction Powertrain
- [219] SACH, A. und F.J. FEIKUS. Laufflächenbildung in Aluminium-Motorblöcken. Werkstoffe im Automobilbau 98/99. *Sonderausgabe MTZ und ATZ*, 1999, 72-74
- [220] SALJÉ, E. Untersuchungen zum Prozessablauf beim Honen von Grauguss-Kurbelgehäusen. Lehrstuhl und Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF), TU Braunschweig, 1984
- [221] SALJÉ, E. und H. MUSHARDT. Untersuchungen über den Prozessablauf beim Innenrundhonen anhand von Zerspanungskraftmessungen. VDI-Z 125, Nr. 12, 1983, S. 471-474
- [222] SALJÉ, E., H. MUSHARDT und M. von SEE. Honen von Automobilzylindern. In: E. SALJÉ, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 1987, S. 326-338. ISBN 3-8027-2675-8
- [223] SCHATTAUER, A. *Prozessentwicklung und Charakterisierung einer anodisch-keramisierten Al-Zylinderlaufbahn unter tribologischen Aspekten zur Reduzierung der CO₂-Emissionen*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2009
- [224] SCHERGE, M. und A. REHL. Reibungs- und Verschleißuntersuchungen am tribologischen System "Kolbenring - Zylinderlaufbahn". In: VDI WISSENSFORUM

- GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2109: 5. VDI Fachtagung mit Fachausstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2010, S. 247-258. ISBN 978-3-18-092109-9
- [225] SCHLEIF, B. *Reibungsminimierung im System Zylinderlaufbahn / Kolbenringe der thermisch gespritzten Laufbahnbeschichtung*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Aachen: Shaker Verlag GmbH, 2016. ISBN 978-3-8440-4537-6
- [226] SCHLEIF, B., L. DETERS und H. ZIEGELE. *Reibungsminderung durch Optimierung von thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen*. Göttingen, 1. Oktober 2013. 53. Tribologie-Fachtagung 2013
- [227] SCHLEIF, B., W. WAGENER und L. DETERS. Friction investigation with thermally sprayed Fe-based coatings for application on cylinder running surfaces in combustion engines. In: L.P. NIELSEN, I.M. SIVEBÆK, S.S. ESKILSEN, S. LOURING und L.E. LARSEN, Hg. *Nordtrip 2014. The 16th Nordic Symposium On Tribology*. Linköpings Universitet: Linköping University Electronic Press, 2014. ISBN 978-87-92765-26-0
- [228] SCHMID, J. Moderne Leichtmetallwerkstoffe für den Motorenbau und deren Endbearbeitung durch Honen. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, 1998, (Jahrgang 59), 248-257
- [229] SCHMID, J. Zylinderlaufflächen für Leichtmetallmotoren und ihre Honbearbeitung. In: VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, Hg. *VDI-Berichte 1764: Zylinderlaufbahn, Hochleistungskolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2003, S. 207-252. ISBN 3-18-091764-4
- [230] SCHMID, J. Optimierte Honverfahren für Gusseisen-Laufflächen. In: VDI WISSENSFORUM IWB GMBH, Hg. *VDI-Berichte 1906: Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2006, S. 217-236. ISBN 3-18-091906-X
- [231] SCHMID, J. Aktueller Stand der Laufflächentopologie für Verbrennungsmotoren: Thermische Spritzschichten und ihre Alternativen. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2163: 6. VDI Fachtagung mit Fachausstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2012, S. 207-224. ISBN 978-3-18-092163-1

- [232] SCHMID, J. Large Engine Cylinder Honing as a Contribution to Emissions Reduction [online]. *MTZ industrial, Development Tribology*, May 2013, (Volume 3, Issue 1), 48-53 [Zugriff am: 7. Dezember 2015]. Verfügbar unter:
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40353-013-0071-z#>
- [233] SCHMID, J. und K.-H. BERGEN. Galvanisches Auftragshonen. *wt.-Z. ind. Fertigung* 76, 1986, 395-399
- [234] SCHMID, J., T. HOEN und W. STUMPF. Weniger Verschleiß und Ölverbrauch durch Spiralgleithonen bei Deutz-Motoren. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, 2009, (Jahrgang 70), 325ff
- [235] SCHNEIDER, E., D. BLOSSFIELD, D. LECHMAN, R. HILL und J. BREVICK. Effect of cylinder bore out-of-roundness on piston ring rotation and engine oil consumption. *SAE Technical Paper Series*, 1993, (Nr. 930796)
- [236] SCHNEIDER, R. Unrundbearbeitung von Zylinderbohrungen durch Formhonen. *wt Werkstattstechnik online*, 2001, (101, H. 1/2), 88-90
- [237] SCHNELL, C. *Laufflächenvorbereitung und Honen thermischer Spritzschichten in Aluminiumzylinderkurbelgehäusen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan-Verlag, 2012. Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig. ISBN 3802783174
- [238] SCHÜBEL, M., W. BLÜMLHUBER, A. BAUER und W. WAGENER. Funktionale, thermische Spritzschichten als Zylinderflächen in Aluminiumkurbelgehäusen bei Großserienapplikation. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2163: 6. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2012, S. 131-140. ISBN 978-3-18-092163-1
- [239] SCHULTHEIß, H., D. MUSCH und T. HILBERT. Optimierung von Zylinderverzügen im Rahmen des Motorenentwicklungsprozesses. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2230: 7. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2014, S. 239-254. ISBN 978-3-18-092230-0
- [240] SCHÜTZ, M., G. DOLL, A. WALTNER und R. KEMMLER. Der neue 3,0-l-V6-DI-Ottomotor mit Bi-Turbo von Mercedes-Benz. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, 2013, (Jahrgang 74), 462-471

- [241] SCHWEIG, F., K. DRÖDER, H.-W. HOFFMEISTER, T. SPITZNAGEL und A. WIENS. Einfluss der Schneidmittelspezifikation beim Formhonen thermischer Spritzschichten. In: H.-W. HOFFMEISTER und B. DENKENA, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2019, S. 348-360. ISBN 978-3-8027-3091-7
- [242] SCHWEIG, F., K. DRÖDER, H.-W. HOFFMEISTER, T. SPITZNAGEL, A. WIENS, T. GROßE, G. FLORES und H. ZIEGELE. Prozessoptimierung beim Formhonen mittels Kraftmessuntersuchungen. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2230: 7. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2014, S. 221-238. ISBN 978-3-18-092230-0
- [243] SEE, M. von. *Optimierung von Honprozessen auf der Basis von Modellversuchen und -betrachtungen*. Dissertation TU Braunschweig, 1989
- [244] SEEFELD, T., R. HEINEMANN und K. FÄRBER. Laserlegieren von Aluminium-Zylinderlaufbahnen. In: VDI WISSENSFORUM IWB GMBH, Hg. *VDI-Berichte 1906: Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2006, S. 185-202. ISBN 3-18-091906-X
- [245] SMOLKA, K. *Thermisches Spritzen. Ein Leitfaden für den Praktiker*. Düsseldorf: Dt. Verl. für Schweisstechnik, 1985. Die schweisstechnische Praxis. 15. ISBN 9783871555213
- [246] SPITZNAGEL, T., N. BERBERICH und U. GABBERT. Reduktion der Zylinderverzüge zur Effizienzsteigerung von Verbrennungsmotoren – Eine numerische Potentialstudie. In: N. N., Hg. *Berichtsband des 2. Automobiltechnischen Kolloquiums*. Garching, 2011. ISBN 978-3-942980-00-5
- [247] STECHER, F. Zylinderverformung. Untersuchung in einer Modellanlage und im laufenden Motor. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, 1970, (31), 505-511
- [248] STEINPARZER, F., N. KLAUER, D. KANNENBERG und H. UNGER. Der neue aufgeladene 2,0-l-Vierzylinder-Ottomotor von BMW. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*, 2011, (Jahrgang 72), 928-937
- [249] STRIBECK, R.J. Die wesentlichen Eigenschaften für Gleit- und Rollenlager,. *Zeitung Verein Deutscher Ingenieure*, 1902, (Vol. 46), 1341-1348; 1432-1438; 1463-1470

- [250] TALIB, R.J., S. SAAD, TOFF, M. R. M. und H. HASHIM. Thermal Spray Coating Technology. A Review. *Solid State Science and Technology*, 2003, (Vol. 11, No.1), 109-117
- [251] TOMANIK, E. *Piston Ring Conformability in a Distorted Bore*. In: SAE Technical Paper Series, Nr. 960356, 1996
- [252] TÖNSHOFF, T. *Formgenauigkeit, Oberflächenrauheit und Werkstoffabtrag beim Langhubhonen*. Dissertation Universität Karlsruhe, 1970
- [253] UEBELHÖR, P. *Inprocess-Geometriemessung beim Honen*. Dissertation, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Universität Karlsruhe, 1994
- [254] GENERAL MOTORS CORPORATION. United States Patent: Honing Tool for elliptical cylinder bore. US5681210
- [255] VAN BASSHUYSEN, R. und F. SCHÄFER. *Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. 3., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2005. ATZ-MTZ-Fachbuch. ISBN 978-3-5282-3933-6
- [256] Verein Deutscher Ingenieure (VDI). VDI 3394, *Aufbau und Anwendung von Schleifkörpern mit Diamant und kubisch kristalinem Bornitrid (CBN) für die Metallbearbeitung*
- [257] VERPOORT, C., D.J. COOK, K.A. KOWALSKY und R. DICKS. *Beschichtung von Aluminium-Motorblöcken durch das FORD PTWA-Beschichtungsverfahren*, 2003
- [258] VOIT, K. *Design Analysis of the piston system*. T&N Symposium Würzburg - Indianapolis, Paper 14, 1995
- [259] WANG, Y.-Y., C.-J. LI und A. OHMORI. Influence of substrate roughness on the bonding mechanisms of high velocity oxy-fuel sprayed coatings [online]. *Thin Solid Films*, 2005, (485, 1-2), 141-147. ISSN 00406090. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.tsf.2005.03.024#
- [260] WEIGMANN, U.-P. Formhonen von Kolbenlaufbahnen. In: H.-W. HOFFMEISTER und B. DENKENA, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2007, S. 298-318. ISBN 978-3802729416
- [261] WEIGMANN, U.-P. *Formhoning of piston running surfaces*. Charleston, South Carolina, USA, 2007. Vortrag ICEF

- [262] WIENS, A. *Formhonen von Zylinderlaufbahnen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan-Verlag, 2011. ISBN 978-3-8027-8315-9
- [263] WIENS, A., G. FLORES, H.-W. HOFFMEISTER und M. LAHRES. Methodik zur Zielformverbesserung und Bearbeitungszeitreduktion beim Formhonen von Zylinderlaufbahnen. In: H.-W. HOFFMEISTER und B. DENKENA, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2011, S. 250-258. ISBN 978-3802729591
- [264] WIENS, A., G. FLORES, U. KLINK und T. ABELN. Makro- und Mikroformbearbeitung von Zylinderbohrungen mittels Freiformhonen. In: H.-W. HOFFMEISTER und B. DENKENA, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2007, S. 298-339. ISBN 978-3802729416
- [265] WIENS, A., H.-W. HOFFMEISTER, M. LAHRES und G. FLORES. Formhonen von Zylinderlaufbahnen in Kurbelgehäusen mittels eines piezoelektrischen Formhonwerkzeuges. In: H.-W. HOFFMEISTER und B. DENKENA, Hg. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Verfahren und Maschinen*. Essen: Vulkan-Verlag, 2009, S. 265-280
- [266] WIENS, A., M. LAHRES, H.-W. HOFFMEISTER und G. FLORES. Fertigungstechnischer Ansatz zur Kompensation von Zylinderverzügen mittels Formhonen - Antiverzugsbearbeitung von Zylinderlaufbahnen. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2109: 5. VDI Fachtagung mit Fachausstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2010, S. 133-146. ISBN 978-3-18-092109-9
- [267] WIGREN, J. Technical Note: Grit Blasting as Surface Preparation before Plasma Spraying. *Surface & Coating Technology*, 1988, (34), 101-108
- [268] XAVIER, F.-A. *How honing can increase engine performance and reduce production costs*. Darmstadt, 23. November 2011. 11th Powertrain Manufacturing Conference
- [269] XAVIER, F.-A. *Honing of Thermal Spray Coatings*. Chemnitz, 8. April 2014. 3rd ICMC 2014 / 3rd eniPROD-Colloquium
- [270] YOKOYAMA, K., R. ICHIMIYA, K. IWATA und T. MORIWAKI. Analyses of thermal deformations of workpiece in honing process (4th Report). *Bulletin of Japan Society of Precision Engineering*, 1987, (Vol. 21, No. 2), 119-124

- [271] ZAK, O. und B. TONN. Weiterentwicklung einer $AlSi17Cu4Mg$ -Legierung zur Herstellung von monolithischen Motorblöcken im Druckguss. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2109: 5. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel: Innovative Systeme im Vergleich*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2010, S. 45-56. ISBN 978-3-18-092109-9
- [272] ZAPF, B. und M. MÜNZBERG. CylinderBoreCoating - Fully integrated LDS-Coating in AL-crankcase manufacturing lines. In: VDI WISSENSFORUM GMBH, Hg. *VDI-Berichte 2230: 7. VDI Fachtagung mit Fachaussstellung, Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2014, S. 283-300. ISBN 978-3-18-092230-0
- [273] ZETTEL, H.-D. *Abtragssteigerung und Formverbesserung beim Langhubhonen*. Dissertation Universität Karlsruhe, 1974
- [274] ZUM GAHR, K.-H. *Tribologie: Reibung - Verschleiß - Schmierung*. In: *Naturwissenschaften*, 72, S. 260-267, 1985
- [275] ZURRIN, R. *Variables Formhonen durch rechnergestützte Honprozesssteuerung*. Dissertation Universität Karlsruhe, 1974
- [276] ZURRIN, R. *Verformungs- und Kräfteanalyse beim Honvorgang mit Hilfe der FEM*. Honen in Forschung und industrieller Anwendung, Dezember 1989. Fachtagung am 04. und 05. in Braunschweig